

THESES

présentées à l'Université de Nancy I
pour l'obtention du grade de
Docteur ès-Sciences Physiques

par

Michel PERRUT

Ancien Elève de l'Ecole Polytechnique

PREMIERE THESE

EXTRACTION LIQUIDE-LIQUIDE
HYDRODYNAMIQUE ET TRANSFERT DE MATIERE
DANS LES COLONNES A PULVERISATION

ANNEXES — TABLEAUX — FIGURES

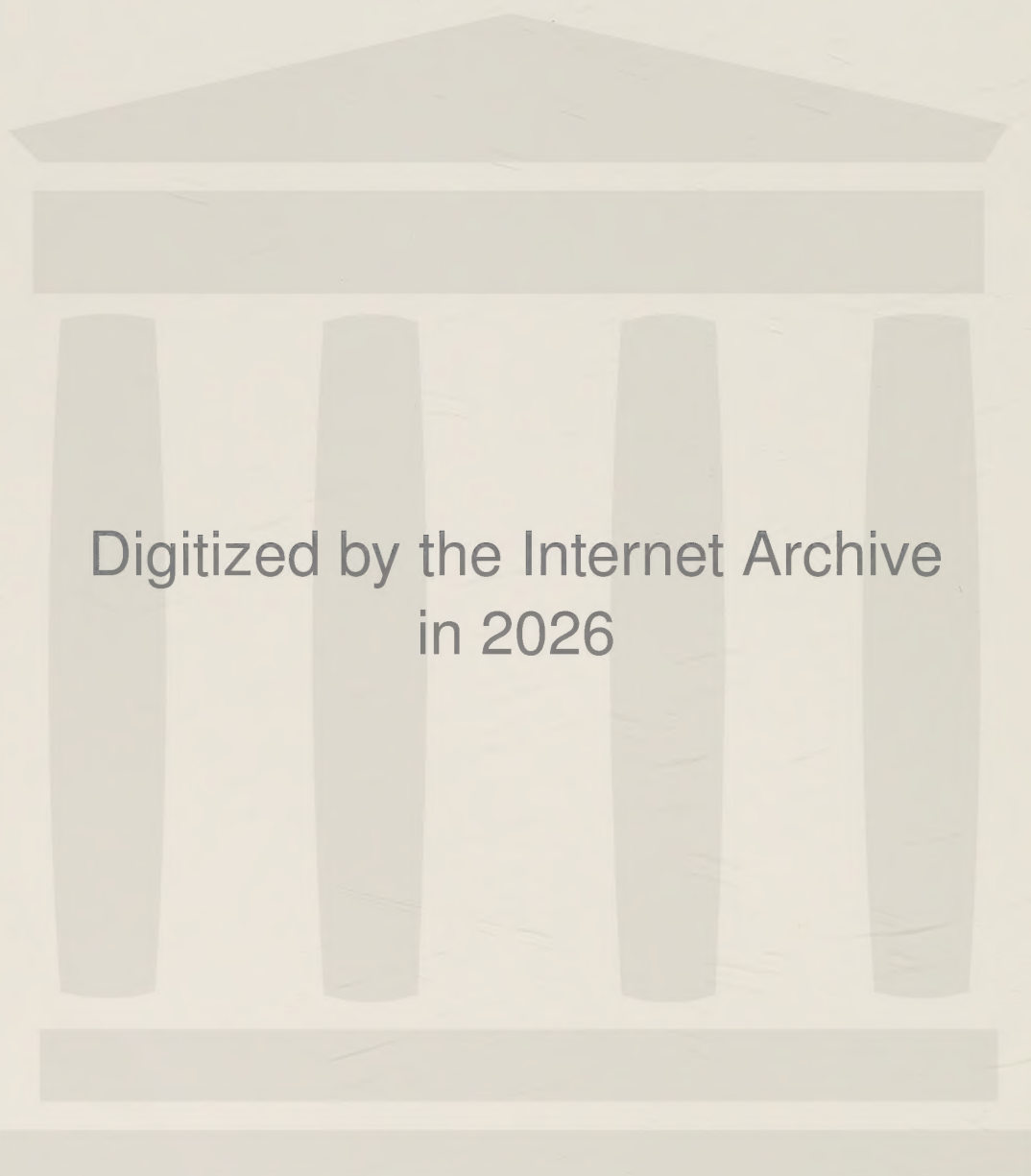
DEUXIEME THESE

REGIMES TRANSITOIRES DANS LES COLONNES A DISTILLER

SOUTENUES PUBLIQUEMENT LE 1^{er} MARS 1972, DEVANT LA COMMISSION D'EXAMEN

Membres du Jury :

MM.	P.	LE GOFF	Président
	A.	VIGNES	Examineurs
	J.	VILLERMAUX	
	C.	VERNET	Invités
	R.	LOUTATY	



Digitized by the Internet Archive
in 2026

https://archive.org/details/IA41551912_0002

THESES

présentées à l'Université de Nancy I
pour l'obtention du grade de
Docteur ès-Sciences Physiques

par

Michel PERRUT

Ancien Elève de l'Ecole Polytechnique

PREMIERE THESE

**EXTRACTION LIQUIDE-LIQUIDE
HYDRODYNAMIQUE ET TRANSFERT DE MATIERE
DANS LES COLONNES A PULVERISATION**

ANNEXES — TABLEAUX — FIGURES

DEUXIEME THESE

REGIMES TRANSITOIRES DANS LES COLONNES A DISTILLER

SOUTENUES PUBLIQUEMENT LE 1^{er} MARS 1972, DEVANT LA COMMISSION D'EXAMEN

Membres du Jury :

MM.	P.	LE GOFF	Président
	A.	VIGNES	Examineurs
	J.	VILLERMAUX	
	C.	VERNET	Invités
	R.	LOUTATY	

UNIVERSITY OF LEIDEN

LIBRARY OF THE
UNIVERSITY OF LEIDEN
DEPARTMENT OF THE HISTORY OF SCIENCE

UNIVERSITY OF LEIDEN
DEPARTMENT OF THE HISTORY OF SCIENCE

UNIVERSITY OF LEIDEN

EXPERIMENTAL PHYSICS
HYDRODYNAMICS AND AERODYNAMICS
DANS LES DOSSIERES A PRESERVATION



UNIVERSITY OF LEIDEN

UNIVERSITY OF LEIDEN

UNIVERSITY OF LEIDEN

UNIVERSITY OF LEIDEN

UNIVERSITY OF LEIDEN

UNIVERSITY OF LEIDEN

UNIVERSITY OF LEIDEN

UNIVERSITY OF LEIDEN

PLAN GENERAL

- ANNEXES
- TABLEAUX
- FIGURES

ANNEXES

ANNEXE A I

- A I 1 Taille des gouttes formées avec un ajutage : études antérieures
- A I 2 Références bibliographiques

ANNEXE A III

- A III 1 Moyens d'analyse
- A III 2 Solution du système d'équations différentielles (1)(2)
- A III 3 Programme de calcul du couple (N_C, P_C) optimal
- A III 4 Dépouillement des résultats obtenus par Cavers et Ewanchyna [1]
- A III 5 Mesure du coefficient de transfert de matière d'une goutte isolée évoluant en milieu infini
- A III 6 Critère d'efficacité et comparaison de divers extracteurs
- A III 7 Références bibliographiques

ANNEXE A IV

- A IV 1 Mesure du nombre d'unités de transfert et du nombre de Péclet axial par une méthode impulsioneille
- A IV 2 Dépouillement des résultats

ANNEXE A V

- A V 1 Modèle de Letan et Kehat
- A V 2 Références bibliographiques

A I 1 TAILLE DES GOUTTES FORMEES AVEC UN AJUTAGE :
ETUDES ANTERIEURES

A I 11 Formation des gouttes à faible vitesse u_N

- Pour u_N voisin de 0 : Harkins et Brown [4] ont montré que le volume V formé peut être obtenu en égalant la poussée d'Archimède $V\Delta\rho g$ et les forces interfaciales $\pi\Phi\sigma$; ils ont introduit un coefficient de correction f pour tenir compte de la partie de liquide restant sur l'ajutage au moment où la goutte se rompt.

$$V\Delta\rho g = \pi\Phi\sigma f$$

soit :

$$V = \frac{\pi\Phi\sigma}{\Delta\rho g} f \quad (A 1)$$

Ils ont montré que f est une fonction de $\Phi/2a_c$ (figure A 1), a_c étant la constante de Laplace :

$$a_c = \left(\frac{2\sigma}{\Delta\rho g} \right)^{\frac{1}{2}} \quad (A 2)$$

D'après (A 1) on peut aussi déterminer la tension interfaciale σ à partir de cette méthode (méthode dite de la goutte pendante) ; dans ce cas, il est plus simple d'exprimer f comme fonction de $\Phi/V^{\frac{1}{3}}$. Des raffinements ont d'ailleurs été apportés à cette méthode [22].

- Pour $u_N \leq u_J$: Plusieurs auteurs ont essayé de généraliser l'équation (A 1) de Harkins et Brown [4] au cas où u_N n'est pas très faible, les gouttes se formant encore les unes après les autres à l'ajutage sans qu'un jet ne se forme.

Hayworth et Treybal [5] ont étendu l'équation (A 1) de Harkins et Brown au cas où u_N n'est pas négligeable en introduisant des forces d'inertie et des forces de résistance :

$$V + 4,11.10^{-4} V^{\frac{2}{3}} \left(\frac{\rho_D u_N^2}{\Delta\rho} \right) = 21.10^{-4} \left(\frac{\sigma\Phi}{\Delta\rho} \right) + \\ + 1,069.10^{-2} \left(\frac{\Phi^{0,747} u_N^{0,365} \mu_C^{0,186}}{\Delta\rho} \right)^{\frac{3}{2}}$$

Ils ont présenté une abaque permettant d'obtenir le diamètre de la goutte en évitant une longue itération. L'équation (A 3) a été vérifiée expéri-

mentalement par ces auteurs pour plusieurs systèmes liquide - liquide avec $u_N < 30$ cm/s.

Null et Johnson [13] proposent un modèle de la géométrie de la goutte pendant la formation et en déduisent une corrélation très compliquée qui est, de ce fait, peu utilisable.

Ryan [16] présente une corrélation semi-empirique :

$$V = \frac{\pi\Phi\sigma}{\Delta\rho g} \left[\underset{\substack{\text{Harkins} \\ \text{et Brown}}}{f} + 1,38 \frac{g\Delta\rho d}{\sigma} \frac{\Phi u_N}{2u_T} - 2,23 \frac{\rho_D \Phi u_N^2}{2} \right] \quad (A 4)$$

où u_T est la vitesse terminale de la goutte (calculée par la corrélation de Hu et Kintner [6]). Les constantes ont été obtenues par un traitement statistique de 491 résultats expérimentaux.

Meister et Scheele [8] font un traitement théorique approchant et obtiennent :

$$V = f \left[\underset{\substack{\text{Harkins} \\ \text{et Brown}}}{\frac{\pi\Phi\sigma}{\Delta\rho g}} + 20 \frac{\mu_C U_D \Phi}{g\Delta\rho d^2} - 4 \frac{\rho_D U_D u_N}{3g\Delta\rho} + 4,5 \left(\frac{U_D^2 \Phi^2 \rho_D \sigma}{(g\Delta\rho)^2} \right)^{\frac{1}{3}} \right] \quad (A 5)$$

On remarquera que les équations (A 4) et (A 5) sont assez voisines, les trois premiers termes étant analogues aux constantes près, u_T n'étant pas très différente de u_s vitesse de Stokes donnée par :

$$u_s = \frac{g\Delta\rho d^2}{18 \mu_C}$$

Ces deux équations se simplifient d'ailleurs considérablement lorsque la viscosité μ_C de la phase continue est faible. On obtient alors V sans itération. L'équation (A 5) a été testée avec succès par ses auteurs pour un grand nombre de systèmes présentant des gammes de propriétés physiques très étendues.

Rao et Coll. [14] ont proposé deux modèles basés sur la formation de la goutte en deux étapes :

- un stade statique au cours duquel la goutte grossit jusqu'à ce que la poussée d'Archimède égale la force de tension interfaciale ;
- un deuxième stade au cours duquel la goutte se détache, tout en continuant à grossir.

La faiblesse de ce modèle réside dans le fait que le volume de la goutte ainsi calculé est toujours supérieur à celui obtenu par l'équation (A 1),

ce qui n'est pas conforme à l'expérience [8] .

Discussion : le maniement des corrélations proposées est souvent assez long sauf dans des cas particuliers. L'équation (A 5) est celle qui a été testée avec succès pour des systèmes liquide - liquide présentant des propriétés physiques variant avec la plus grande marge.

A I 12 Régime intermédiaire : u_N voisin de u_J

Meister et Scheele [11] ont présenté une modification de l'équation (A 5) pour cette gamme de vitesses :

$$V = f \left[\frac{\pi \Phi \sigma}{\Delta \rho g} - \frac{4 \rho_D U_D u_N}{3 \left(\frac{d_J}{\Phi} \right)^2 g \Delta \rho} + \frac{20 \mu_C U_D d_J}{d^2 g \Delta \rho} + 4,50 \left(\frac{U_D^2 d_J^2 \rho_D \sigma}{(g \Delta \rho)^2} \right)^{\frac{1}{3}} \right] \quad (A 6)$$

A I 13 Formation des gouttes par rupture d'un jet

a) Détermination de la vitesse de "jetting" u_J

Des corrélations empiriques ou semi-empiriques ont été proposées par plusieurs auteurs pour évaluer la vitesse critique u_J pour laquelle le mode de formation des gouttes changent.

Smith et Moss [17] ont étudié le cas de liquides injectés dans un gaz ; ils proposent :

$$u_J = K \left(\frac{\sigma}{\rho_D \Phi} \right)^{\frac{1}{2}} \quad (A 7)$$

K étant compris entre 2 et 3 et variant avec la tension interfaciale σ .

Funijawa et Coll. [2] ont présenté la corrélation empirique :

$$u_J = 4,4 \cdot \sigma^{0,2} \Phi^{-\frac{1}{2}} \quad (A 8)$$

Meister et Scheele [9] ont étudié théoriquement deux mécanismes de formation du jet qui les ont conduit à deux équations dont l'une est en très bon accord avec leurs résultats expérimentaux :

$$u_J = K \left[\frac{\sigma}{\rho_D \Phi} \left(1 - \frac{\Phi}{d} \right) \right]^{\frac{1}{2}} \quad (A 9)$$

où K vaut 1,73 ou 2 suivant que l'on suppose que le profil des vitesses

dans l'ajutage est parabolique (laminaire) ou plat (turbulent).

Ryan [16] propose une corrélation empirique :

$$\frac{\rho_D}{\Delta\rho} \left(\frac{2u_J^2}{\Phi g} \right)^{\frac{1}{2}} = 1,64 \left(\frac{\sigma}{\Delta\rho g \Phi^2} \right)^{0,95} \quad (A 10)$$

soit en confondant 0,95 avec 1 :

$$u_J \approx 1,16 \frac{\sigma}{\rho_D \Phi \sqrt{g \Phi}} \quad (A 11)$$

b) Détermination de la taille des gouttes formées

Un jet liquide cylindrique de diamètre d_J est soumis à des vibrations provenant d'après Rayleigh [15] d'une distribution de perturbations capillaires qui amèneront la rupture du jet. Rayleigh [19] a montré que si l'on néglige les effets inertiels des deux fluides supposés non visqueux, la perturbation d'amplitude maximale aura pour longueur d'onde :

$$\lambda_{opt} = 4,508 d_J \quad (A 12)$$

Cette valeur a été vérifiée expérimentalement par Haenlein [3] et Tyler [20] pour des jets liquides dans un gaz. Le jet se rompra donc en gouttes de volume :

$$V = \lambda_{opt} \frac{\pi d_J^2}{4} \quad (A 13)$$

soit :

$$V = \frac{4,508}{4} \pi d_J^3 \quad (A 14)$$

Supposant la goutte sphérique et le diamètre d_J du jet égal au diamètre Φ de l'ajutage, il vient :

$$\frac{d}{\Phi} = 1,89 \quad (A 15)$$

De nombreux raffinements ont été apportés à ce calcul et de nouvelles corrélations semi-empiriques ont été proposées.

Weber [21] négligeant les effets d'inertie du fluide extérieur, a étendu le calcul en tenant compte de la viscosité du jet :

$$\lambda_{opt} = \pi \left[2 \left(1 + \sqrt{\frac{9\mu_D^2}{\rho_D \sigma d_J}} \right) \right]^{\frac{1}{2}} \cdot d_J \quad (A 16)$$

Tomotika [18] a traité le problème dans le cas général. En simplifiant ses équations, il aboutit à λ_{opt} pour des fluides très visqueux;

λ_{opt} est alors fonction du rapport des deux viscosités μ_D/μ_C .

Meister et Scheele [12] ont repris les équations générales obtenues par Tomotika [18] et ont donné des corrélations graphiques permettant d'obtenir λ_{opt} pour tous les systèmes liquide - liquide :

$$\lambda_{opt} = f \left(\frac{\mu_D}{\mu_C}, N_0, \frac{\rho_D}{\rho_C} \right)$$

N_0 étant égal à :

$$\frac{(\sigma \rho_D \Phi)^{\frac{1}{2}}}{\mu_C + 3 \mu_D}$$

Ces auteurs [10, 11] ont traité de façon théorique le problème de la longueur du jet et du mécanisme de rupture en gouttes ; ils en déduisent une corrélation compliquée d'usage peu aisé mais qui semble bien correspondre à leurs mesures expérimentales. Comme d'autres auteurs [1, 7] l'avaient déjà rapporté, ils ont observé que la longueur du jet passe par un maximum quand u_N croît et que, pour cette longueur maximale, la taille des gouttes est minimale. De plus, la distribution des diamètres est faible pour $u_N < u_{max}$ et augmente beaucoup pour $u_N > u_{max}$.

Christiansen et Hixson [1] ont proposé une corrélation donnant le diamètre des gouttes correspondant à la vitesse critique u_{max} :

$$d \approx k d_J$$

k est donné par l'observation des ondes dans le jet ; pour la plupart des systèmes utilisés ces auteurs ont observé $k = 1,92$, la mesure des diamètres de gouttes les conduisant à une moyenne de 2,07. Le diamètre d_J du jet peut être évalué selon eux par une corrélation graphique qu'on peut résumer par [19] :

$$(A 16) \quad \left\{ \begin{array}{ll} \frac{\Phi}{d_J} = 0,485 Eo + 1 & \text{pour } Eo < 0,615 \end{array} \right.$$

$$(A 17) \quad \left\{ \begin{array}{ll} \frac{\Phi}{d_J} = 1,51 Eo^{\frac{1}{2}} + 0,12 & \text{pour } Eo > 0,615 \end{array} \right.$$

le jet se contractant d'autant plus que le nombre : $Eo = \frac{g \Delta \rho \Phi^2}{\sigma}$ est plus grand.

A I 14 Présence de tensio-actifs

La présence de tensio-actifs ne peut être entièrement prise en compte d'après [8] et [1] par la seule modification de la tension interfaciale statique σ . Un facteur d'efficacité dépendant de la nature du tensio-

actif (longueur de la chaîne carbonée) doit être introduit [1] .

A I 15 Présence de transfert de matière

Peu de résultats sont présentés dans la littérature. Les gouttes sont plus petites en présence de transfert de matière que pour des systèmes saturés [14] . De plus, la longueur du jet est réduite par la présence du transfert de matière ; d'autre part, le jet est plus long lorsque le transfert a lieu de la phase continue vers le jet que dans le cas contraire [10].

Aucune corrélation n'a été proposée.

A I 2 REFERENCES BIBLIOGRAPHIQUES

- [1] CHRISTIANSEN R.M., HIXSON A.N., Ind. Eng. Chem., 49, 1957, 1017
- [2] FUNIJAWA K., MARUYAMA T., NAKAIKE Y., Kagaku Kikai, 21, 1957, 21
- [3] HAENLEIN A., Forsch. Gebiete Ing., A2, 1931, 139
- [4] HARKINS W.D., BROWN F.E., J. Amer. Chem. Soc., 41, 1919, 499
- [5] HAYWORTH C.B., TREYBAL R.E., Ind. Eng. Chem., 42, 1950, 1176
- [6] KINTNER R.C., HU S., A.I.Ch.E. Journal, 1, 1955, 42
- [7] KEITH F.W., HIXSON A.N., Ind. Eng. Chem., Proc. Des. Dev., 47, 1955, 258
- [8] MEISTER B.J., SCHEELE G.F., A.I.Ch.E. Journal, 14, 1968, 9
- [9] MEISTER B.J., SCHEELE G.F., A.I.Ch.E. Journal, 14, 1968, 15
- [10] MEISTER B.J., SCHEELE G.F., A.I.Ch.E. Journal, 15, 1969, 689
- [11] MEISTER B.J., SCHEELE G.F., A.I.Ch.E. Journal, 15, 1969, 700
- [12] MEISTER B.J., SCHEELE G.F., A.I.Ch.E. Journal, 13, 1967, 682
- [13] NULL H.R., JOHNSON H.F., A.I.Ch.E. Journal, 4, 1958; 273
- [14] RAO E.V.L., KUMAR R., KULLOOR N.R., Chem. Eng. Sci., 21, 1966, 867
- [15] RAYLEIGH, Proc. London Math. Society, 10, 1879, 4
- [16] RYAN J.T., Ph. D. Thesis, Univ. of Missouri, 1966
- [17] SMITH S.W.J., MOSS H., Proc. Roy. Soc.(London), A93, 1917, 373
- [18] TOMOTIKA S., Proc. Roy. Soc.(London), A146, 1934, 322
- [19] TREYBAL R.E., Liquid extraction, McGraw Hill Co., 1963, 466
- [20] TYLER E., Phil. Mag., 16, 1933, 504
- [21] WEBER C.Z., Angnew. Math. Mech., 11, 1931, 136
- [22] WINKEL D., The Journal of Phys. Chem., 69, 1965, 348

A III 1 MOYENS D'ANALYSE

A III 11 Analyse du ternaire Heptane - DMSO - Benzène

Cette analyse a été faite par chromatographie en phase gazeuse à l'aide d'un chromatographe INTERSMAT 16 C 12 M avec une colonne imprégnée de Porapak, le gaz vecteur étant l'hydrogène. La température de l'injecteur, du four et de la cellule (catharomètre) était réglée à 200°.

Les pics d'eau^x, d'heptane et de benzène étaient symétriques et faciles à trianguler. Par contre, le pic de DMSO présentait une forte traînée et a été triangulé de la manière présentée sur la figure A 2. Les surfaces des pics doivent être affectées de coefficients correctifs relatifs au catharomètre et mesurés avec des échantillons étalons :

Eau	0,54
Heptane	0,98
Benzène	1,00
DMSO	1,27

et permettent d'évaluer les titres massiques X. Nous avons converti les titres massiques du soluté (le benzène) en concentrations $C = X\rho$, ρ étant la masse volumique de la phase de titre massique X. Nous présentons sur la figure A 3 les courbes obtenues expérimentalement donnant la masse volumique en fonction du titre massique pour la phase Heptane - Benzène et pour la phase DMSO - Benzène.

Cette méthode d'analyse permet de connaître les titres ou concentrations des 4 constituants dans les deux phases. Cependant, elle est relativement longue à mettre en oeuvre et le dépouillement manuel est pénible et assez imprécis. La mesure de la concentration du benzène par réfractométrie eût sans doute été plus facile et plus précise. La teneur en eau, avec laquelle varie très fortement le coefficient de partage et la sélectivité du solvant, ne peut être obtenue facilement que par dosage direct ou par chromatographie.

x Le DMSO contenait 6 % d'eau afin d'accroître sa sélectivité dans l'extraction du benzène du mélange Heptane - Benzène.

La courbe de partage obtenue est une droite de pente

$$\frac{C_{\text{DMSO}}}{C_{\text{Heptane}}} = 0,538$$

A III 12 Analyse du ternaire Heptane - Eau - Acétone

Cette analyse a été faite à l'aide d'un réfractomètre d'Abbe utilisant la lumière produite par une lampe à vapeur de sodium. Les très faibles solubilités de l'heptane dans la phase lourde ou de l'eau dans la phase légère permettent une détermination rapide et précise de la concentration en acétone dans chaque phase à l'aide des courbes de variations de l'indice en fonction de la concentration obtenues à l'aide de solutions étalons (figure A 4).

La précision est plus grande pour la phase aqueuse étant donné la plage de variation de l'indice. Toutes les mesures ont été faites à 20,0°C, l'indice variant rapidement en fonction de la température. La courbe de partage n'est pas une droite : elle est présentée sur la figure A 5.

A III 2 SOLUTION DU SYSTEME D'EQUATIONS DIFFERENTIELLES (1)(2)

Le modèle d'écoulement piston avec dispersion axiale dans la phase continue a conduit au système d'équations linéaires à coefficients constants (1)(2) que l'on peut résoudre analytiquement en lui associant les conditions aux limites dites de Danckwerts. Suivant que r est égal ou différent de 1, les calculs conduisent aux expressions suivantes :

$$\text{a) } \underline{r = 1} : \begin{cases} x(\xi) = K_1 + K_2 \xi + K_3 e^{-(N_C + P_C) \xi} & (\text{A } 1) \\ y(\xi) = K'_1 + K'_2 + K'_3 e^{-(N_C + P_C) \xi} & (\text{A } 2) \end{cases}$$

$$\text{avec } K_1 = 1 - \frac{N_C + P_C / N_C (N_C + P_C)}{\Delta} \quad K'_1 = 1 - \frac{N_C}{\Delta}$$

$$K_2 = K'_2 = - \frac{(N_C + P_C) P_C}{\Delta} \quad K_3 = - \frac{P_C}{\Delta} \quad K'_3 = \frac{N_C}{\Delta}$$

et
$$\Delta = 2(N_C + P_C) + P_C \left(\frac{P_C}{N_C} + N_C + P_C \right) - N_C e^{-(N_C + P_C)}$$

b) $\underline{r \neq 1}$:

$$\begin{cases} x(\xi) = K_1 + K_2 e^{\lambda_2 \xi} + K_3 e^{\lambda_3 \xi} & (A\ 3) \\ y(\xi) = K'_1 + K'_2 e^{\lambda_2 \xi} + K'_3 e^{\lambda_3 \xi} & (A\ 4) \end{cases}$$

$$\lambda_{2,3} = \frac{-(P_C + rN_C) \pm \sqrt{\delta}}{2} \quad \text{et} \quad \delta = P_C + (rN_C)^2 - 2rN_C P_C + 4 N_C P_C$$

$$K_1 = K'_1 = 1 + \frac{rP_C(\lambda_2 - \lambda_3)}{\Delta}$$

$$K_2 = \frac{P_C \lambda_3}{\Delta} \quad K'_2 = \frac{r N_C P_C \lambda_3}{\Delta(N_C r + \lambda_2)}$$

$$K_3 = -\frac{P_C \lambda_2}{\Delta} \quad K'_3 = -\frac{r N_C P_C \lambda_2}{\Delta(N_C r + \lambda_3)}$$

avec
$$\Delta = -rP_C(\lambda_2 - \lambda_3) + \lambda_2 \lambda_3 (e^{\lambda_3} - e^{\lambda_2}) + P_C (\lambda_2 e^{\lambda_3} - \lambda_3 e^{\lambda_2})$$

Ces expressions permettent en connaissant C_{CE} , C_{DE} , m , r , L , N_C et P_C , de tracer les profils de concentrations correspondant au modèle utilisé. Inversement, connaissant ces profils (ou quelques points de ces profils), m , r , L on peut en déduire par optimisation N_C et P_C .

A III 3 PROGRAMME DE CALCUL DU COUPLE (N_C, P_C) OPTIMAL

Le calcul du couple (N_C, P_C) optimal à partir des points expérimentaux obtenus tout le long de la colonne fait appel au sous-programme ESVIG de la bibliothèque de sous-programmes de l'Ecole Nationale Supérieure des Industries Chimiques de Nancy et mis au point par Malengé et de Santiago. Le programme principal fait appel en plus à trois sous-programmes CAFOR, CAFOS et CAFON ; ils sont donnés ci-dessous. De plus, nous utilisons la table traçante en faisant appel aux sous-programmes IBM SCALE, EPLLOT, POINT.

La structure du programme principal est la suivante :

- Lecture des profils et des données : r , C_{CE} , C_{DE}/m (qui sera appelé C_{DE}), $C_C(z)$ et $C_D(z)/m$ ainsi que les échelles des axes de coordonnées portés sur la table traçante.

- Traçage des points expérimentaux sur la table traçante.

- Mise sous forme adimensionnelle (on remarquera que le programme cité correspond à la colonne A de longueur 84 cm).

- Optimisation en faisant appel à ESVIG et CAFON. Ecriture de (N_C, P_C) optimaux (contenue dans ESVIG).

- Calcul des profils optimaux en variables adimensionnelles (appel de CAFON).

- Calcul des profils optimaux en variables (concentrations-distance) et traçage de ces profils (appel de CAFOR et CAFOS).

Les sous-programmes ont les rôles suivants :

- CAFON permet de calculer les valeurs théoriques $\bar{x}(\xi_i)$ et $\bar{y}(\xi_i)$ d'après les solutions du système d'équation différentielle donné à l'annexe A III 3.

- CAFOR et CAFOS permettent de calculer les valeurs de C_C et C_D/m correspondant aux $\bar{x}$ et $\bar{y}$.

Le temps de passage est assez court, les séquences les plus longues correspondant au traçage des axes, des points expérimentaux et des profils théoriques.


```

// FOR ENSIC
*ONE WORD INTEGERS
*EXTENDED PRECISION
*LIST SOURCE PROGRAM
*NONPROCESS PROGRAM
*IOCS(CARD,1443PRINTER,DISK)
    EXTERNAL CAFON
    DIMENSION X(2),YEXP(50),PASX(2)
    COMMON Z(19),NX,R,NY,A1,A2,A3,B1,B2,B3,AMBD2,AMBD3,L
1250 READ(2,1) R,CCE,CDE,YS,YO,NX,NY
    1 FORMAT(F4.2,F4.1,F4.1,F2.0,F3.0,2I1)
    NEXP=NX+NY
    NY=NX+1
    READ(2,3)(YEXP(I),Z(I),I=1,NX)
    READ(2,3)(YEXP(I),Z(I),I=NY,NEXP)
    2 FORMAT(10(F4.1,F3.0))
    READ(2,4)X
    3 FORMAT(2F4.1)
    CALL SCALE(0.2,YS,0.,YO)
    DENOM=CCE-CDE
    CALL EPLOT(1,Z(1),YEXP(1))
    DO 10 I=1,NEXP
    CALL EPLOT(-2,Z(I),YEXP(I))
    CALL POINT(1)
    CALL EPLOT(1,Z(I),YEXP(I))
    Z(I)=Z(I)/84.
10 YEXP(I)=(CCE-YEXP(I))/DENOM
    PAUSE
    NINC=2
    NBITE=200
    IMPR=10
    PRECD=1.E-08
    PASX(1)=X(1)/10.
    PASX(2)=X(2)/10.
    CALL DATSW(1,I)
    GO TO (1250,1252),I
1252 CALL ESVIG(NINC,NEXP,YEXP,X,PASX,CAFON,NBITE,PRECD,IMPR)
    CALL CAFON(X,YEXP,YEXP,FONCT,NEXP)
    ZI=0.
    CALL CAFOR(X,ZI,Y,CCE,CDE)
    CALL EPLOT(1,0.,Y)
    CALL EPLOT(2,0.,Y)
    DO 30 I=1,18
    ZI=ZI+5.
    CALL CAFOR(X,ZI,Y,CCE,CDE)
    CALL DATSW(1,J)
    GO TO (1250,30),J
30 CALL EPLOT(0,ZI,Y)
    ZI=0.
    CALL CAFOS(X,ZI,Y,CCE,CDE)
    CALL EPLOT(1,0.,Y)
    CALL EPLOT(2,0.,Y)
    DO 40 I=1,18
    ZI=ZI+5.
    CALL CAFOS(X,ZI,Y,CCE,CDE)
40 CALL EPLOT(0,ZI,Y)
    PAUSE
    GO TO 1250
    CALL EXIT
    END

```



```
// JOB
// XEQ TABTR FX
```

```
// FOR
*ONE WORD INTEGERS
*NONPROCESS PROGRAM
*LIST SOURCE PROGRAM
*EXTENDED PRECISION
SUBROUTINE CAFOR(X,ZI,Y,CCE,CDE)
DIMENSION X(1)
COMMON XSI(19),NX,R,NY,A1,A2,A3,B1,B2,B3,AMBD2,AMBD3
ZIJ=ZI/84.
Y=A1+A2*EXP(AMBD2*ZIJ)+A3*EXP(AMBD3*ZIJ)
Y=-Y*(CCE-CDE)+CCE
RETURN
END
```

```
// FOR
*ONE WORD INTEGERS
*NONPROCESS PROGRAM
*LIST SOURCE PROGRAM
*EXTENDED PRECISION
SUBROUTINE CAFOS(X,ZI,Y,CCE,CDE)
DIMENSION X(1)
COMMON XSI(19),NX,R,NY,A1,A2,A3,B1,B2,B3,AMBD2,AMBD3
ZIJ=ZI/84.
Y=B1+B2*EXP(AMBD2*ZIJ)+B3*EXP(AMBD3*ZIJ)
Y=-Y*(CCE-CDE)+CCE
RETURN
END
```

```
// FOR
*ONE WORD INTEGERS
*NONPROCESS PROGRAM
*LIST SOURCE PROGRAM
*EXTENDED PRECISION
SUBROUTINE CAFON(X,YCAL,YEXP,FONCT,NEXP)
DIMENSION X(1),YCAL(1),YEXP(1)
COMMON XSI(19),NX,R,NY,A1,A2,A3,B1,B2,B3,AMBD2,AMBD3
FONCT=0.
DELTA=X(2)**2+(R*X(1))**2-2.*R*X(1)*X(2)+4.*X(1)*X(2)
AMBD2=-(X(2)+R*X(1)-SQRT(DELTA))/2
AMBD3=-(X(2)+R*X(1)+SQRT(DELTA))/2
D=-R*X(2)*(AMBD2-AMBD3)+AMBD2*AMBD3*(EXP(AMBD3)-EXP(AMBD2))+X(2)*
1 AMBD2*EXP(AMBD3)-AMBD3*EXP(AMBD2))
A1=1.+(R*X(2)*(AMBD2-AMBD3))/D
A2=X(2)*AMBD3/D
A3=-X(2)*AMBD2/D
B1=A1
B2=X(1)*R*X(2)*AMBD3/(D*(X(1)*R+AMBD2))
B3=-X(1)*R*X(2)*AMBD2/(D*(X(1)*R+AMBD3))
DO 1 I=1,NX
YCAL(I)=A1+A2*EXP(AMBD2*XSI(I))+A3*EXP(AMBD3*XSI(I))
1 FONCT=FONCT+(YCAL(I)-YEXP(I))**2
DO 2 I=NY,NEXP
YCAL(I)=B1+B2*EXP(AMBD2*XSI(I))+B3*EXP(AMBD3*XSI(I))
2 FONCT=FONCT+(YCAL(I)-YEXP(I))**2
RETURN
END
```


A III 4 DEPOUILLEMENT DES RESULTATS OBTENUS PAR
CAVERS ET EWANCHYNA [1]

Utilisant une colonne à pulvérisation de type Elgin de 116 cm de hauteur et de 3,82 cm de diamètre, fonctionnant en lit lâche, ces auteurs ont déterminé les profils de concentration dans la phase continue et dans la phase dispersée pour le système ternaire Méthylisobutylcétone (MIK) - Eau - Acide Acétique^x. Nous avons repris leurs points expérimentaux et nous les avons traités de manière identique aux nôtres à l'aide du modèle piston avec dispersion axiale dans la phase continue.

Les figures A 6 - A 9 présentent les profils fournis par l'optimisation du couple (N_C, P_C) : l'accord avec les points expérimentaux est satisfaisant aussi bien pour le profil de concentration dans la phase continue que celui relatif à la phase dispersée, montrant que le modèle est adéquat et que l'hypothèse selon laquelle la dispersion axiale est négligeable dans la phase dispersée est parfaitement justifiée (il n'y a pas de saut à l'entrée de la phase dispersée).

Les figures A 6 - A 8 correspondent au transfert de matière de la phase continue vers la phase dispersée (absence de coalescence signalée par l'auteur) et la figure A 9 à un transfert de matière des gouttes vers la phase continue (coalescence très importante signalée par l'auteur) ; on notera que le nombre d'unités de transfert est beaucoup plus grand dans le 1er cas que dans le second comme on pouvait le prévoir et comme le confirme le tableau A 1 qui présente l'ensemble des conditions expérimentales et des résultats de l'optimisation : r calculé d'après la relation (13), β donné par les auteurs, V_r calculé à partir des débits et du taux de rétention, le couple (N_C, P_C) optimal et les coefficients de transfert de matière et de dispersion axiale ; k_C a été obtenu en supposant que les gouttes avaient un diamètre moyen de 0,25 cm (soit 0,1 pouce), l'auteur signalant que les axes horizontaux et verticaux des gouttes mesurés pour la manipulation n° 39 valaient respectivement 0,16 et 0,09 pouce et que la taille chan-

^x Nous avons utilisé la courbe d'équilibre donné par Fleming et Johnson [2].
Le coefficient de partage est quasi-constant et égal à 0,50 ($C_{\text{MIK}}/C_{\text{Eau}}$).

geait peu d'une manipulation à l'autre lorsque le transfert avait lieu de la phase continue vers les gouttes.

Le nombre de Margoulis $Ms_C = k_C / V_r$ reste voisin de la valeur moyenne $5,44.10^{-4}$ dont l'ordre de grandeur est le même que celui obtenu avec nos trois systèmes ternaires. Les valeurs de α_C sont par contre plus faibles que celles que nous avons obtenues à des vitesses relatives comparables (figure 41) ; le diamètre D de la colonne et surtout le rapport D/d des diamètres de la colonne et des gouttes (égal à 15) étant plus faible, on pouvait prévoir ce décalage ; par contre, nos résultats et ceux de Loutaty correspondent à des D/d analogues (18 - 25).

A III 5 MESURE DU COEFFICIENT DE TRANSFERT DE MATIERE D'UNE GOUTTE ISOLEE EVOLUANT EN MILIEU INFINI

A III 51 Appareil

Nous avons utilisé la colonne schématisée sur la figure A 10. Les gouttes sont formées à l'aide d'un ajutage vissé sur un tube coulissant permettant de faire varier la distance parcourue par la goutte entre l'ajutage et l'entonnoir où elle est recueillie. Cet entonnoir possède un tube horizontal permettant de recueillir les gouttes à l'aide d'une petite "louchette" en verre. L'interface où coalescent les gouttes est très réduit, ce qui minimise le transfert de matière après la coalescence. Un trop-plein coulissant permet de régler le niveau supérieur de la phase continue contenue dans la colonne. Un bac en charge alimente à travers un robinet de précision l'ajutage où se forment les gouttes.

A III 52 Mesures

Pour les deux ternaires Heptane - DMSO - Benzène et Heptane - Eau - Acétone, nous avons mesuré le coefficient de transfert de matière et la vitesse de déplacement de gouttes formées à l'aide de plusieurs ajutages de diamètres différents.

Le diamètre d des gouttes a été obtenu en recueillant 100 ou

200 gouttes et en mesurant le volume. La vitesse V_r^∞ de déplacement a été évaluée à partir du temps mis par la goutte pour parcourir la distance de 75 cm séparant deux repères placés sur les parois de la colonne. La phase continue étant immobile et pure (concentration nulle en soluté), le coefficient de transfert peut être facilement évalué en mesurant la concentration des gouttes pour plusieurs hauteurs d'ascension. En effet, le bilan de matière s'écrit :

$$(A\ 1) \quad V_g \frac{d C_D}{dt} = - k_D S_g (C_D - m C_C) dt = - k_D S_g C_D dt$$

Or, les gouttes sont sphériques et en posant $dz = V_r^\infty dt$

$$(A\ 2) \quad \frac{d C_D}{C_D} = - \frac{6 k_D}{d V_r^\infty} dz$$

Si on suppose k_D et V_r^∞ constants entre z_1 et z_2 il vient :

$$(A\ 3) \quad \log \left(\frac{C_D(z_1)}{C_D(z_2)} \right) = \frac{6 k_D}{d V_r^\infty} (z_2 - z_1)$$

D'où l'on peut tirer k_D .

A III 53 Résultats

Les courbes donnant la concentration dans les gouttes en fonction de la hauteur d'ascension sont des droites en coordonnées semi-logarithmiques comme le montre la figure A 11, où l'on voit que k_D est constant tout le long de la colonne. On notera que ces droites ne passent pas pour $z = 0$ au point d'ordonnée 1, un certain transfert ayant lieu pendant la formation de la goutte.

Le tableau A 2 rassemble l'ensemble de nos résultats et en particulier les valeurs de k_D / V_r^∞ qui est indépendant de d . Le coefficient de transfert relatif à la phase continue est lié à k_D par :

(A 4) $k_C = m k_D$ si m est le coefficient de partage. Pour le ternaire Heptane - DMSO - Benzène, m est constant et égal à 0,562 (la teneur en eau du DMSO était légèrement différente de celle utilisée pendant les manipulations dans les colonnes à pulvérisation où nous avons obtenu un coefficient de partage valant 0,538). Pour le ternaire Heptane - Eau - Acétone, m n'est pas constant comme le montre la figure A 5 présentée dans

l'annexe A III 1 ; nous avons pris sa valeur moyenne dans la plage de concentrations considérée : 0,110 .

A III 6 CRITERE D'EFFICACITE ET COMPARAISON DE DIVERS EXTRACTEURS

La "qualité" d'un extracteur dépend à la fois de son efficacité globale exprimée par exemple en nombre d'unités de transfert apparent ou en nombre de plateaux théoriques et de sa capacité mesurée par le débit spécifique qu'il peut traiter, ce débit étant défini en général comme la somme des débits d'entrée des deux phases. En effet, il est souvent possible de relier le coût d'investissement au volume de l'extracteur : il sera d'autant plus intéressant qu'il sera moins haut pour une efficacité donnée et de section plus faible pour traiter des débits donnés.

C'est sur ces bases que plusieurs auteurs [2, 4, 5, 6] ont introduit le critère d'efficacité W / HET , W étant la vitesse spécifique égale à la somme des vitesses en fût vide des deux phases ($U_C + U_D / \Omega$) et HET la hauteur d'un étage théorique, en vue de comparer divers types d'extracteurs. Cette comparaison suppose que les liquides traités soient identiques et que les diamètres des extracteurs soient voisins du fait que le mélangeage axial dépend en général beaucoup de ce diamètre.

Une seule étude a été menée dans ces conditions par Ponikarov et coll. [4] avec le système de liquides suivant :

- la charge est un mélange à 75 % d'eau, 20 % d'éthanol et 5 % d'alcools supérieurs ;
- le solvant est une coupe d'hydrocarbures légers (33-44°C) amylène - pipérylène.

Le soluté est constitué par les alcools supérieurs et le coefficient de partage est nettement en faveur du solvant.

Le tableau A 3 rassemble les valeurs maximales de W / HET obtenues pour un rapport du débit de solvant au débit de charge égal à 0,66. On notera que dans la colonne à pulvérisation (fonctionnant ici en lit

lâche) les vitesses spécifiques W sont beaucoup plus grandes que dans les autres extracteurs ; par contre, HET y est très importante.

Sur le tableau A 4, nous avons porté l'ensemble de nos résultats obtenus avec les deux ternaires. Nous sommes conduits à des HET deux fois plus grandes en lit lâche qu'en lit dense. Les valeurs de W / HET sont intéressantes en lit dense, atteignant $8,20$, $8,40$ et $11,5 \cdot 10^{-2} \text{ s}^{-1}$ dans les trois cas. Si on suppose que l'efficacité W / HET est également double de celle en lit lâche dans le cas étudié par Ponikarov et coll [4], on est conduit à $W / HET = 9,3 \cdot 10^{-2} \text{ s}^{-1}$, ce qui est nettement supérieur aux efficacités des autres extracteurs.

La colonne à pulvérisation fonctionnant en lit dense apparaît donc comme un extracteur très compétitif avec les autres types qui sont tous beaucoup plus coûteux à construire. Cependant, il ne faut pas perdre de vue que ces résultats concernent des colonnes de faible diamètre et qu'il convient donc de ne pas les extrapoler hâtivement car le mélangeage axial dépend beaucoup du diamètre des colonnes.

A III 7 REFERENCES BIBLIOGRAPHIQUES

- [1] CAVERS S.D., EWANCHYNA J.E., Can. Journal Chem. Eng., 35, 1957, 113
- [2] COGGAN, Inst. Chem. Engrs Sympo. Ser., Newcastle upon Tyne, 1967, 151
- [3] FLEMING J.F., JOHNSON H., Chem. Eng. Prog., 49, 1953, 497
- [4] PONIKAROV I.I., NIKOLAEV A.M., ZHAVORONKOV N.M., Int. Chem. Eng., 2 1962, 546
- [5] POPE B.J., SHAH M.R., ISEC La Haye, 1971, n° 33.
- [6] PROCHAZKA J., LANDAU J., SOUHRADA F., HEYBERGER A., Congrès de Moscou, 1971.

A IV 1 MESURE DU NOMBRE D'UNITES DE TRANSFERT ET DU NOMBRE DE
PECLET AXIAL PAR UNE METHODE IMPULSIONNELLE

Le modèle d'écoulement piston avec dispersion axiale dans la phase continue a été utilisé pour interpréter les profils de concentrations obtenus en régime permanent et a permis d'obtenir par optimisation le couple (N_C, P_C) des valeurs du nombre d'unités de transfert et du nombre de Péclet axial relatifs à la phase continue. Nous allons montrer ci-dessous que l'analyse de la courbe de réponse à une impulsion Dirac de soluté dans la phase continue peut permettre théoriquement d'obtenir ce couple (N_C, P_C) .

A IV 11 Mise en équation du problème

Les débits des deux phases, le taux de rétention, le diamètre des gouttes, les coefficients de transfert de matière et de dispersion axiale sont supposés constants tout le long de la colonne. Les équations aux dérivées partielles en régime transitoire s'obtiennent facilement (la phase continue s'écoule dans le sens Oz et la phase dispersée en sens inverse) :

- Phase continue : dans une tranche d'épaisseur dz le bilan de soluté s'écrit

$$\underbrace{\Omega (1 - \beta) \frac{\partial C_C}{\partial t} dz}_{\text{Accumulation}} = \underbrace{- U_C \frac{\partial C_C}{\partial z} dz}_{\text{Convection}} - \underbrace{k_C a \Omega dz (C_C - C_D/m)}_{\text{Transfert}} + \underbrace{\alpha_C \frac{\partial^2 C_C}{\partial z^2} \Omega (1 - \beta) dz}_{\text{Dispersion}} \quad (A 1)$$

- Phase dispersée : l'écoulement de la phase dispersée étant supposé piston, le bilan de soluté s'écrit :

$$\underbrace{\beta \Omega \frac{\partial C_D}{\partial t} dz}_{\text{Accumulation}} = \underbrace{U_D \frac{\partial C_D}{\partial z} dz}_{\text{Convection}} + \underbrace{k_C a \Omega dz (C_C - C_D/m)}_{\text{Transfert}} \quad (A 2)$$

- Emploi de variables adimensionnelles : Introduisons les variables adimensionnelles :

$$\begin{aligned} \theta &= \frac{U_C}{L(1-\beta)\Omega} t & \xi &= \frac{z}{L} & N_C &= \frac{k_C a \Omega L}{U_C} \\ R &= \frac{U_D}{U_C} \frac{1-\beta}{\beta} & S &= \frac{\beta m}{1-\beta} & P_C &= \frac{U_C L}{\Omega(1-\beta)D_C} \quad (x) \end{aligned}$$

et posons, pour simplifier l'écriture, $C_C = x$ et $\frac{C_D}{m} = y$ (xx)
Les équations (A 1) et (A 2) deviennent :

$$(A\ 3) \quad \frac{1}{P_C} \frac{\partial^2 x}{\partial \xi^2} = \frac{\partial x}{\partial \theta} + \frac{\partial x}{\partial \xi} + N_C (x - y)$$

$$(A\ 4) \quad 0 = \frac{\partial y}{\partial \theta} - R \frac{\partial y}{\partial \xi} - \frac{N_C}{S} (x - y)$$

- Conditions aux limites : Reprenant les conditions de Danckwerts, on obtient pour une impulsion Dirac de soluté les conditions aux limites suivantes :

$$\left\{ \begin{array}{l} \xi = 0 \quad \partial(\theta) = x(0, \theta) - \frac{1}{P_C} \frac{\partial x}{\partial \xi} (0, \theta) \\ \xi = 1 \quad \left\{ \begin{array}{l} \left(\frac{\partial x}{\partial \xi} \right)_{\xi=1} = 0 \\ y(1, \theta) = 0 \end{array} \right. \end{array} \right.$$

A IV 12 Analyse de la courbe-réponse

Le système (A 3) (A 4) et les trois conditions aux limites permettent théoriquement de déterminer les fonctions $x(\xi, \theta)$ et $y(\xi, \theta)$ en connaissant les quatre paramètres R , S , N_C , et P_C . Pratiquement, on mesure la courbe-réponse à la sortie de la phase continue soit $C_C(1, t)$; on connaît également les deux débits U_C , U_D et le coefficient de partage m ; la valeur de β est obtenue soit par mesure directe, soit par évaluation à partir des lois de l'hydrodynamique, ce qui conduit aux paramètres R et S . Les deux inconnues du problème sont N_C et P_C et plusieurs méthodes permettent de les déterminer en faisant appel à la transformation de Laplace.

a) Transformation de Laplace : Introduisons X et Y transformées de

(x) On notera que $D_C (1 - \beta) = \alpha_C$

(xx) On pourrait aussi faire intervenir les efficacités $\frac{C_{CE} - C_C}{C_{CE} - C_{DE}/m}$ et $\frac{C_{CE} - C_D/m}{C_{CE} - C_{DE}/m}$

Laplace de x et y :

$$\begin{cases} X(\xi, s) = \int_0^{+\infty} x(\xi, \theta) e^{-s\theta} d\theta \\ Y(\xi, s) = \int_0^{+\infty} y(\xi, \theta) e^{-s\theta} d\theta \end{cases}$$

Le système (A 3) et (A 4) et les conditions aux limites s'écrivent alors (X', X'', Y' et Y'' étant les dérivées premières et secondes de X et Y par rapport à ξ) :

$$\begin{cases} \frac{1}{P_C} X'' = X' + N_C (X - Y) + sX & (A 5) \\ RY' - \frac{N_C}{S} (X - Y) + sY = 0 & (A 6) \end{cases}$$

avec

$$\begin{cases} X(0, s) - \frac{1}{P_C} X'(0, s) = 1 \\ Y(1, s) = 0 \\ X'(1, s) = 0 \end{cases}$$

Si on élimine Y entre les équations (A 5) et (A 6), il vient alors :

$$(A 7) \quad X''' - P_C \left[1 + \frac{1}{R P_C} \left(\frac{N_C}{S} + s \right) \right] X'' - P_C \left[N_C \left(1 - \frac{1}{R S} \right) + s \left(1 - \frac{1}{R} \right) \right] X' + \frac{P_C s}{R} \left[s + N \left(1 + \frac{1}{S} \right) \right] X = 0$$

avec

$$\begin{cases} X(0, s) - \frac{1}{P_C} X'(0, s) = 1 \\ X'(1, s) = 0 \\ (N + s) X(1, s) - \frac{X''(1, s)}{P_C} = 0 \end{cases}$$

D'après la définition, X(1, s) est la fonction de transfert G(s) du système puisque c'est la transformée de Laplace de la réponse x(1, θ) à une impulsion Dirac.

b) Méthode de détermination de N_C et P_C :

- Méthode directe. L'équation (A 7) peut être résolue puisque c'est une équation linéaire à coefficients constants (indépendants de la variable ξ , mais pas de la variable s) sans second membre ; la solution est de la forme :

$$X = C_1 e^{\lambda_1 \xi} + C_2 e^{\lambda_2 \xi} + C_3 e^{\lambda_3 \xi} \quad \text{avec } \lambda_1, \lambda_2, \lambda_3 \text{ racines de}$$

l'équation caractéristique du 3^e degré.

Les coefficients C_1 , C_2 et C_3 sont obtenus à l'aide des trois conditions aux limites. On peut alors comparer $X(1,s)$ avec la transformée de Laplace de la courbe réponse expérimentale et connaissant R et S déterminer le couple N_C et P_C par optimisation.

- Méthode des moments. On peut également traiter l'information contenue dans la courbe expérimentale en utilisant les moments ; le calcul des moments d'ordre 0 et 1 est en particulier facile et précis, les moments d'ordre supérieur sont connus avec une imprécision croissante liée au problème de troncature des queues. Par ailleurs, on peut obtenir les valeurs théoriques de μ_0 et μ_1 d'après l'équation (A 7) . En effet :

$$\begin{cases} \mu_0 = X(1,s=0) \\ \mu_1 = -\frac{\partial X(1,s=0)}{\partial s} \end{cases}$$

En faisant $s = 0$ dans (A 7) on est conduit à l'équation :

$$(A 8) \quad X''' - \left(P_C + \frac{N_C}{RS} \right) X'' - N_C P_C \left(1 - \frac{1}{RS} \right) X' = 0$$

$$\text{avec} \quad \begin{cases} \xi = 0 & X - \frac{1}{P_C} X' = 0 \\ \xi = 1 & \begin{cases} N_C X - \frac{X''}{P_C} = 0 \\ X' = 0 \end{cases} \end{cases}$$

On en déduit μ_0 par un calcul assez simple en fonction de RS , N_C et P_C . Le calcul est particulièrement facile dans le cas où $RS = 1$ (qui correspond à $r = 1$).

Le moment d'ordre 1 μ_1 est beaucoup plus difficile à obtenir et deux méthodes sont possibles :

- Analytiquement : on pose $X(1,s) = X(1,0) + sZ(\xi)$ pour des valeurs de s au voisinage de 0. On reporte dans (A 7) et on en déduit après un calcul pénible $\mu_1 = -Z(1)$ en fonction de R , S , N_C et P_C .

- Numériquement : pour chaque ensemble de valeurs (R, S, N_C et P_C) on peut calculer $X(1,s)$ au voisinage de $s = 0$ d'après la méthode directe exposée ci-dessus et on a alors :

$$\mu_1 = \lim_{s \rightarrow 0} \frac{X(1,0) - X(1,s)}{s}$$

Le calcul est là encore très long. Cependant il n'est pas évident que cette

méthode soit plus longue que la méthode analytique.

La comparaison des valeurs expérimentales de μ_0 et μ_1 aux valeurs théoriques obtenues pour le couple (R,S) correspondant aux conditions expérimentales et pour plusieurs couples (N_C, P_C) permet de déterminer le couple (N_C, P_C) optimal.

A IV 13 Discussion

Dans la réponse à une impulsion de Dirac de soluté transférable, une information suffisante est contenue pour obtenir les paramètres N_C et P_C du modèle que nous considérons, R et S étant déterminés par des mesures directes. Il n'est pas pour autant évident que l'on puisse utiliser cette méthode à cette fin. Mis à part les problèmes pratiques d'injection (réalisation d'un pic très aigu, injection bien répartie dans un plan, linéarité... etc), le traitement de la courbe réponse ne pourra être conduit de façon précise à un seul couple (N_C, P_C) véritablement optimal sans des heures de calcul sur ordinateur et il apparaît que la complexité du traitement limite sérieusement l'intérêt de cette méthode.

On peut envisager son remplacement par l'utilisation parallèle de deux méthodes bien plus simples à traiter, mais nécessitant deux manipulations distinctes :

- Réponse à une impulsion quelconque de soluté transférable qui conduit à l'efficacité E de l'appareil ($E : 1 - \mu_0$) .

- Réponse à une impulsion de Dirac d'un corps non transférable dans la phase continue afin de mesurer le nombre de Péclet axial P_C .

A IV 2 DEPOUILLEMENT DES RESULTATS

Le dépouillement des résultats expérimentaux a été mené par une méthode précise et rapide à l'aide d'un calculateur IBM 1800 muni d'un lecteur automatique de courbe appelé "Courbogyre" et mis au point dans le laboratoire de Génie Chimique de l'Ecole Nationale Supérieure des Industries Chimiques de Nancy.

Dans un premier temps, la courbe d'étalonnage du spectrophotomètre UV donnant la concentration en soluté en fonction du rapport I/I_0 est lue par le courbogyre avec un pas très fin (0,1 mm) et enregistré sur disque.

Chaque courbe-réponse à une injection de traceur dans la colonne est lue par le courbogyre et enregistrée sur un autre fichier du disque. La comparaison avec le fichier d'étalonnage permet d'en déduire la courbe de la concentration de sortie de la phase aqueuse en fonction du temps et après intégration on en déduit facilement la quantité q de soluté sortie de la colonne dans cette phase aqueuse. L'efficacité E est alors calculée ainsi que le rapport d'extraction r et le nombre d'étages théoriques.

Les programmes de lecture de la courbe d'étalonnage et de dépouillement de la courbe-réponse à l'impulsion sont présentés ci-dessous. On notera qu'ils font appel au sous-programme CACRO du courbogyre.

La précision de la méthode est très satisfaisante et des tests de reproductibilité ont montré que pour dix lectures successives de la courbe-réponse les valeurs de l'efficacité E obtenues présentaient un écart maximal de 1 % avec la valeur moyenne. Le temps de lecture de la courbe dépend du pas choisi ; pour un pas de 1 mm elle est inférieure à 10 s.


```

// JOB
// FOR ENSIC
*IOCS(CARD,1443PRINTER,DISK)
*NONPROCESS PROGRAM
*LIST SOURCE PROGRAM
*ONE WORD INTEGERS
COURBE D'ETALONNAGE
      DIMENSION IY(320)
      DEFINE FILE1(6000,1,U,11)
      DEFINE FILE2(6000,1,U,12)
      JDX1=1
      CALL CACRO(JDX1)
      NB=JDX1/320+1
      WRITE(2,1)JDX1
      I1=1
      I2=2
      DO 1 I=1,NB
      READ(1,I1)(IY(J),J=1,320)
1 WRITE(2,I2)(IY(J),J=1,320)
      CALL EXIT
      END

```

PERRUT ENSIC ETALONNAGE

```

// JOB
// FOR ENSIC
*IOCS(CARD,1443PRINTER,DISK)
*LIST SOURCE PROGRAM
*ONE WORD INTEGERS
*NONPROCESS PROGRAM
      DIMENSION JYIND(1000)
      DEFINE FILE 1(6000,1,U,11)
      DEFINE FILE 2(6000,1,U,12)
      DO 10 I=1,50
      READ(2,2)UC,UD,DI,B
2 FORMAT(4F5.0)
      PAS1=10.
      LECTURE DE LA COURBE REPONSE
      DO11 K=1,2
      JDX1=PAS1
      CALL CACRO(JDX1)
      TRAITEMENT
      CIT=0.
      READ(1,322)JY
      I1=1
      READ(1,I1)(JYIND(MI),MI=1,JDX1)
      DO 4 J=1,JDX1
      Y=JYIND(J)
      IY=IFIX((1.+Y/B)*2350.-235.)
      READ(2,IY)IC
      CI=15.+IC/100.
      CIT=CIT+CI*PAS1
      E=1.-UC*CIT/3600./DI
      R=UC/UD/0.7
      P=(ALOG((1.-E)/(1./R-1)/ALOG(P)))-1.
      WRITE(3,3)I,K,E,P
3 FORMAT(10A,'NUMERO',12,3X,'R=',F5.3,3X,'E=',F5.3,3X,'P=',F5.3)
11 CONTINUE
      CONTINUE
      CALL EXIT
      END

```

PERRUT ENSIC IMPULSION

A V LE MODELE PROPOSE PAR LETAN ET KEHAT

Ces auteurs ont étudié le transfert de chaleur par contact direct dans une colonne à pulvérisation en dispersant du kérosène dans de l'eau. Les profils de température obtenus les ont conduits à proposer un modèle faisant intervenir les sillages de phase continue transportés par les gouttes.

Ce modèle repose sur un certain nombre d'hypothèses :

- Les sillages se forment dans une zone dite de formation et gardent ensuite un volume constant V_s pendant tout le parcours de la goutte.

- L'échange de chaleur entre la phase continue et les gouttes repose uniquement sur un échange d'éléments de phase continue entre les sillages et la phase continue circulant à contre-courant des gouttes.

- Les sillages et les gouttes sont parfaitement mélangés et leurs températures T_s et T_D sont uniformes.

- Les gouttes se déplacent à une vitesse constante et uniforme. D'après les profils de température obtenus dont l'allure est présentée sur la figure A 12, les auteurs distinguent cinq zones dans une colonne fonctionnant en lit lâche :

1) Zone de formation des sillages : peu après la formation des gouttes à la sortie de l'injecteur de phase dispersée, un sillage se forme derrière chaque goutte et atteint sa taille définitive au sortir de cette zone.

Les auteurs proposent le mécanisme de transfert suivant : un élément de phase continue de volume dV_s vient s'ajouter au sillage de volume V_s après avoir pris la température T_D de la goutte ; le bilan de chaleur s'écrit alors :

$$(\rho C_p)_C (T_C - T_D) dV_s = V_g (\rho C_p)_D dT_D \quad (A 1)$$

Les profils expérimentaux montrent que dans cette zone T_C est constante (et égale à T_{CS}). On peut donc intégrer (A 1) :

$$M = \frac{V_s}{V_g} = R \log \frac{T_{DE} - T_{CS}}{T'_{DE} - T_{CS}} \quad (A 2)$$

où $R = \frac{(\rho C_p)_D}{(\rho C_p)_C}$ et T'_{DE} est la température des gouttes à la sortie de la zone de formation des sillages.

Par un bilan de chaleur global dans cette zone, on peut déterminer la température des sillages T'_{sE} au sortir de cette zone :

$$T'_{sE} = \frac{R}{M} (T_D - T_{CS}) (1 - e^{-M/R}) + T_{CS} \quad (A 3)$$

2) Zone de transition : sur une zone de quelques centimètres, les températures des deux phases sont constantes : aucun échange de chaleur n'a lieu.

3) Zone d'échange : les sillages ayant atteint un volume V_s constant, ils échangent en permanence des éléments de volume dS_s avec la phase continue environnante. Les auteurs proposent un mécanisme de transfert de chaleur entre les gouttes, les sillages et la phase continue fondé sur cet échange d'éléments de phase continue ayant été porté à la température T_D par contact avec la goutte, un élément de phase continue vient remplacer dans le sillage un élément de même volume le quittant à la température T_s . Le bilan de chaleur sur un trajet dz de la goutte s'écrit donc :

$$(\rho C_p)_C (T_C - T_D) dS_s = V_g (\rho C_p)_D dT_D \quad (A 4)$$

En posant $S = \frac{dS_s}{dz} \frac{1}{V_g}$, il vient :

$$\frac{dT_D}{dz} + \frac{S}{R} (T_D - T_C) = 0 \quad (A 5)$$

La température du sillage est alors donnée par :

$$(\rho C_p)_C (T_D - T_s) dS_s = V_s (\rho C_p)_C dT_s \quad (A 6)$$

$$\text{Soit : } \frac{dT_s}{dz} + \frac{S}{M} (T_s - T_D) = 0 \quad (A 7)$$

Un bilan de chaleur entre les deux phases conduit alors à :

$$(\rho C_p)_C (U_C + M U_D) dT_C = \frac{U_D}{V_g} (\rho C_p)_C (T_C - T_s) dS_s \quad (A 8)$$

Soit :

$$\frac{dT_C}{dz} + \frac{S}{\frac{U_C}{U_D} + M} (T_s - T_C) = 0 \quad (A 9)$$

L'intégration des trois équations (A 5), (A 7) et (A 9) à trois inconnues T_C , T_s et T_D est très simple et les conditions aux limites sont fixées par les températures des deux phases et des sillages à l'entrée dans la zone d'échange.

4) Zone de mélange : au sommet de la colonne, les profils de température de la phase continue et de la phase dispersée se confondent et les températures sont constantes :

$$T_C = T'_{CE} = T_{DS}$$

La température d'entrée de la phase continue T_{CE} est différente de T'_{CE} et un saut est donc observé. Le bilan de chaleur dans cette zone s'écrit alors :

$$\begin{aligned} MU_D (\rho C_p)_C T'_{sS} + U_D (\rho C_p)_D T'_{DS} + U_C (\rho C_p)_C T'_{CE} = \\ \left[(U_C + MU_D) (\rho C_p)_C + U_D (\rho C_p)_D \right] T'_{CE} \end{aligned} \quad (A 10)$$

T'_{sS} et T'_{DS} étant les températures des sillages et des gouttes à l'entrée de cette zone.

L'équation précédente conduit à l'évaluation du saut :

$$T_{CE} - T'_{CE} = \frac{U_D}{U_C} \left[R (T_{DS} - T'_{DS}) + M (T_{DS} - T'_{sS}) \right] \quad (A 11)$$

5) La zone de coalescence : les sillages sont brisés lorsque les gouttes coalescent et se mélangent à la phase continue. Toutes les températures étant égales aucun transfert n'a lieu.

Une dernière équation peut être écrite, c'est le bilan global pour toute la colonne :

$$T_{CE} = T_{CS} + \frac{U_D (\rho C_p)_D}{U_C (\rho C_p)_C} (T_{DS} - T_{DE}) \quad (A 12)$$

La connaissance des températures d'entrée des deux phases T_{DE} et T_{CE} et des deux paramètres du modèle M et S permet donc de tracer les profils de température par un calcul itératif. Inversement la connaissance des profils permet de déterminer les deux paramètres M et S. [1]

Lorsque l'écoulement est en lit dense dans l'ensemble de la colonne, la partie inférieure demeurant en lit lâche, la formation des sillages a lieu dans cette partie en lit lâche et, à leur entrée dans le lit dense, leur volume diminue et prend une nouvelle valeur V'_S . Il en résulte un saut de température de la phase continue. [2]

En effet, la température des sillages à l'interface lit lâche - lit dense étant donnée par A 3, le bilan de chaleur dans la phase continue s'écrit :

$$(\rho C_p)_C \left[(U_C + M' U_D) T'_{CS} + U_D (M - M') T'_{SE} \right] = (\rho C_p)_C (U_C + U_D M) T_{CS} \quad (A 13)$$

Si M' est différent de M, T'_{CS} sera différent de T_{CS} et un saut va donc apparaître ; M' est alors donné par :

$$M' = \frac{R \frac{U_D}{U_C} \left[(1 - \exp(-M/R)) \right] - \frac{T'_{CS} - T_{CS}}{T_{DE} - T_{CS}}}{\frac{R}{M} \frac{U_D}{U_C} \left[(1 - \exp(-M/R)) \right] + \frac{U_D}{U_C} \frac{T'_{CS} - T_{CS}}{T_{DE} - T_{CS}}} \quad (A 14)$$

Le modèle est identique dans les autres zones de la colonne. Naturellement ce modèle est facilement transposable au transfert de matière ; pour cela il suffit de remplacer T_C par C_C et T_D par C_D/m si m est le coefficient de partage défini par $m = \frac{C_D}{C_C}$ à l'équilibre. [3]

A V 2 REFERENCES BIBLIOGRAPHIQUES

- [1] LETAN R., KEHAT E., A.I. Ch. E. J. 14, 1968, 398
- [2] LETAN R., KEHAT E., A.I. Ch. E. J. 16, 1970, 955
- [3] KEHAT E., LETAN R., A.I. Ch. E. J. 17, 1971, 984

TABLEAUX

- Première Partie 1 - 4
- Deuxième Partie 5 - 6
- Troisième Partie 7 - 9
- Quatrième Partie 10 - 14
- Cinquième Partie 15
- Annexes A 1 - A 4

TABLEAU 1

Caractéristiques des injecteurs

Colonne	Plateau N°	Diamètre des trous cm	Nombre de trous N	Matériau
L	1	0,050	108	Laiton
	2	0,066	104	
	3	0,100	55	
	4	0,100	92	
	5	0,150	85	
	6	0,170	85	
	7	0,200	85	
A ou B	8	0,100	60	Acier inoxydable
	9	0,100	93	
	10	0,105	33	
	11	0,105	60	
	12	0,105	93	
	13	0,160	19	
	14	0,100	79	PTFE

TABLEAU 2

Tropiétés physiques des systèmes liquide - liquide utilisés

N°	Phase dispersée - Phase continue	Soluté en équilibre	ρ_D	ρ_C	σ	μ_D	μ_C	$g\Delta\rho/\sigma$
1	Kerosène - Eau	Ethyl Glycol ^x Ethyl Glycol	0,79	1,0	45	1,19	1,06	4,6
2	Kerosène - Eau + 75 % Ethylène Glycol		0,79	1,09	27,5	0,90	9,40	10,9
3	Kerosène - Ethylène Glycol		0,79	1,12	16	0,90	15,25	19,3
4	Kerosène - Eau		0,79	0,99	16,3	1,19	2,86	12,3
5	Kerosène - Eau		0,79	0,96	4,6	1,19	3,60	37,8
6	Heptane - Eau	Benzène	0,683	1,0	50	0,42	1,00	6,2
7	Heptane - Ethylène Glycol		0,683	1,12	16,4	0,42	18,5	26,2
8	Heptane - DMSO ^{xx}		0,683	1,098	12,3	0,42	2,6	33,0
9	Heptane - DMSO		0,722	1,06	6,0	0,44	2,20	55,0
10	Isobutanol - Eau		0,833	0,984	2,5	3,22	1,45	59,0
11	Ethylène Glycol - CCl ₄	Benzène	1,12	1,59	45	15,1	0,97	10,5
12	Eau + 20 % Ethylène Glycol - CCl ₄		1,03	1,59	39	1,85	0,97	14,1
13	Eau - Kerosène		1,00	0,79	45	1,00	1,19	4,6
14	Eau - Heptane		1,00	0,683	50	0,42	1,00	6,2
15	DMSO - Heptane		1,098	0,683	12,3	2,60	0,42	33,0
16	DMSO - Heptane	Benzène	1,06	0,722	6,0	2,20	0,44	55,0
17	Ethylène Glycol - Heptane		1,12	0,683	16,4	18,5	0,42	26,2
18	CCl ₄ - Eau		1,59	1,00	45	0,97	1,00	12,9
19	CCl ₄ - Ethylène Glycol		1,59	1,12	12	0,97	18,2	38,3
20	CCl ₄ - Eau + 20 % Ethylène Glycol		1,59	1,03	35	0,97	1,85	14,2

x Ethyl Glycol : Monoéthylester de l'Ethylène Glycol

xx DMSO : diméthylsulfoxyde

TABLEAU 3

Taille des gouttes formées par rupture d'un jet :
Résultats expérimentaux

Couple	1				2	3	4	5	7
Plateau	1	2	3	5	3	6	5	5	6
E_0	0,011	0,02	0,046	0,186	0,109	0,56	0,277	0,85	0,76
$\bar{d} / \phi$	2,4 ^x	2,06	2,04	2,04	2,04	1,82	1,98	1,73	1,79

Couple	8	9	10	15	16	17	18	19	20
Plateau	10	8	6	9	12	7	14	13	14
E_0	0,36	0,55	1,70	0,33	0,57	1,05	0,129	0,98	0,142
$\bar{d} / \phi$	1,91	1,85	1,44	1,92	1,86	1,65	2,00	1,66	2,00

x Le point correspondant à cette mesure n'est pas représenté sur la figure. Le plateau 1 fournit des gouttes de très petit diamètre dont l'évaluation est entachée d'une grande erreur.

TABLEAU 4

Hydrodynamique en lit dense : résultats expérimentaux

Couple	1	3	6	8	9	11	12	13
Colonne	L	L	Δ	Δ	Δ	Δ	Δ	L
Plateau	1, 2, 3, 5	6	11	10	8	9	9	4
μ_C / μ_D	0,84	16,95	2,38	6,20	5,00	0,064	0,525	1,19
p	0,725	0,638	0,716	0,621	0,678	1,040	0,898	0,728

Couple	14	15	16	17	18	19	20
Colonne	B	B	B	L	B	B	B
Plateau	14	9	12	7	14	13	14
μ_C / μ_D	0,42	0,16	0,20	0,023	1,03	18,8	1,91
p	0,86	0,991	0,983	0,964	0,719	0,684	0,688

TABEAU 5

Réponse à une perturbation de débit laissant V_D constant (cas n° 1 et 4)
Conditions expérimentales et résultats.

Couple	N°	Pla- teau	Débit de la phase lourde $U_E = U_S$	Débit d'entrée de phase légère		β_{d1}	β_{l1}	β_{d2}	β_{l2}	Droite expérimentale		Droite calculée relation	
				U(1)	U(2)					a	b	a	b
Kéro- sène - Eau	1	1	63,5	46	54	0,525	0,112	0,575	0,085	- 0,177	8,0	- 0,157	7,32
	2	1	63,5	54	46	0,575	0,085	0,525	0,112	0,209	- 9,4	0,185	- 8,7
	3	2	32	77	62	0,65	0,09	0,75	0,05	- 0,25	8,0	- 0,20	7,7
	4	2	32	62	77	0,75	0,055	0,65	0,09	0,28	- 9	0,25	- 9,5
	5	3	63,5	111	124	0,59	0,130	0,57	0,156	0,11	- 7,8	0,11	- 8,4
	6	3	63,5	124	111	0,57	0,156	0,59	0,130	- 0,10	7,34	- 0,10	7,6
	7	5	63,5	233	213	0,56	0,235	0,61	0,20	- 0,192	11,2	- 0,205	11,4
	8	5	63,5	213	233	0,61	0,20	0,56	0,235	0,24	- 14	0,26	- 14,3
	9	5	63,5	196	178	0,65	0,16	0,685	0,132	- 0,115	6,5	- 0,112	6,55
	10	5	63,5	178	196	0,685	0,132	0,65	0,16	0,120	- 6,9	0,113	- 7,6
Eau -	11	4	148	60	144	0,64	0,11	0,40	0,145	1,04	- 17,2	1,08	- 17,8
Kéro- sène	12	4	148	144	60	0,40	0,145	0,64	0,11	- 0,46	7,5	- 0,52	6,6

TABLEAU 6

Réponse à une perturbation faisant varier $\mathcal{V}_D$ (cas n° 5 et 6) :
Conditions de fonctionnement et résultats.

Couple	N°	Plateau	U_{DE} l/h	U_{CE} l/h	β_d mesuré	β_l mesuré	$(\beta_d - \beta_l)$	$\frac{1}{c \Omega}$
Kérosène - Eau	1	1	54	63,5	0,525	0,110	0,415	0,420
	2	2	77	53	0,520	0,120	0,400	0,392
	3	2	85	47	0,520	0,145	0,375	0,382
	4	2	85	75	0,480	0,150	0,330	0,320
	5	2	75	30,5	0,635	0,115	0,520	0,495
	6	3	116	63,5	0,580	0,140	0,440	0,435
	7	5	233	63,5	0,560	0,235	0,325	0,330
	8	5	196	90,5	0,605	0,165	0,440	0,460
	9	5	251	36,5	0,595	0,255	0,340	0,340
Kérosène - Ethylène glycol	10	5	94	41,7	0,540	0,115	0,425	0,390
Eau - Kérosène	11	4	165	60	0,585	0,160	0,425	0,412
	12	4	179	76	0,510	0,190	0,320	0,320

TABLEAU 7

Colonne A Phase dispersée Heptane - Acétone.
 Plateau 11 Phase continue Eau - Acétone.

N°	U_D l/h	U_C l/h	C_{CE}	C_{CS}	C_{DE}/m	C_{DS}/m	$r = \frac{U_C}{mU_D}$	r calculé	HET cm	Régime
1	112	27	200	102	0	175	2,06	1,79	31	dense
2	112	27	200	123	0	156	2,16	2,02	65	lâche
3	125	27	193	109	22	156	1,80	1,60	42	dense
4	98	25	193	123	22	166	2,17	2,06	42	dense
5	98	12,5	176,5	52	0	150	1,20	1,20	19	dense
6	98	12,5	176,5	84	0	123	1,33	1,32	65	lâche
7	87	12,5	158	70	0	140	1,40	1,59	26	dense
8	87	29	210	133	0	192	2,78	2,49	31	dense
9	112	12,5	239	82	0	162	1,00	1,03	42	lâche
10	98	13	210	77	0	169	1,19	1,27	26	dense
11	62	30	286	207	0	255	3,24	3,23	47	lâche
12	62	46	292	247	0	259	5,10	5,75	65	lâche
13	74	12,5	260	95	0	214	1,32	1,30	22	dense
14	74	29	263	178	0	240	2,76	2,83	40	dense
15	112	12,5	225	80	34	175	1,00	0,97	28	dense
16	98	12,5	221	84	0	163	1,22	1,19	37	dense
17	62	12,5	240	153	38	183	1,78	1,72	56	lâche
18	74	29	248	178	0	214	3,32	3,05	47	lâche

Colonne A Phase dispersée Heptane - Benzène.
 Plateau 8 Phase continue DMSO - Benzène.

N°	U_D l/h	U_C l/h	C_{CE}	C_{CS}	C_{DE}/m	C_{DS}/m	$r = \frac{U_C}{mU_D}$	r calculé	HET cm	Régime
1	48	71	221	132,5	117	189	0,80	0,815	20	dense
2	37	79	186	133	101	169	1,23	1,28	34	dense
3	40,5	62	143	35,8	0	94	0,825	0,875	35	dense
4	40,5	62	146	56	0	74	0,825	0,820	53	lâche
5	44,3	60	189	141	130	172	0,73	0,87	24	dense
6	43	38,5	166	77	59	103	0,485	0,495	42	dense

TABLEAU 7

(suite)

Colonne B

Phase dispersée : DMSO - Benzène.

Plateau 12

Phase continue : Heptane - Benzène.

N°	U_D l/h	U_C l/h	C_{CE}	C_{CS}	C_{DE}/m	C_{DS}/m	$r = \frac{U_C}{mU_D}$	r calculé	HET cm	Régime
1	122	155	151	98	10	131	2,20	2,28	60	lâche
2	122	115	234	159	91	224	1,75	1,77	29	dense
3	106	91	238	166	91	192	1,59	1,40	76	lâche
4	107	87	304	263	227	282	1,50	1,35	46	lâche
5	140	64	192	90	69	158	0,85	0,87	27	dense
6	122	78,5	152	52	0	126	1,20	1,26	32	dense
7	122	78,5	152	67	0	117	1,20	1,37	50	lâche
8	148	78,5	107	29	0	76	0,99	0,98	40	dense
9	76	73,2	357	195	88	328	1,73	1,48	30	dense
10	87,5	73,2	314	212	88	242	1,56	1,53	76	lâche

TABLEAU 8

Colonne A Phase dispersée : Heptane - Acétone.
 Plateau 11 Phase continue : Eau - Acétone.

N°	r	β %	$\bar{d}$ cm	a cm ⁻¹	V_r cm/s	N _C	P _C	10 ⁴ . k _C cm/s	α_C cm ² /s
1	1,79	63	0,235	16,0	3,60	2,17	10,4	6,08	3,2
2	2,02	32	0,235	8,18	5,50	1,48	2,73	8,70	11,6
3	1,60	49	0,258	11,4	4,34	1,97	4,75	7,80	6,75
4	2,06	67	0,220	18,2	2,98	1,63	5,41	4,05	5,90
5	1,20	74	0,30	14,8	2,54	3,91	16,3	5,52	0,91
6	1,32	26	0,210	7,4	5,56	3,19	1,62	9,08	9,05
7	1,59	70	0,250	16,75	2,35	3,08	5,54	4,85	1,40
8	2,49	62	0,220	16,9	3,08	1,73	6,16	5,00	5,55
9	1,03	32	0,225	8,6	5,22	4,55	2,36	11,1	6,30
10	1,27	64	0,245	15,6	2,65	3,39	6,10	4,52	12,43
11	3,23	13	0,180	4,34	7,25	1,14	3,55	13,3	10,0
12	5,75	14	0,22	3,82	6,97	0,48	4,43	9,9	12,3
13	1,30	67	0,27	14,9	2,08	2,68	22,7	4,36	0,65
14	2,83	65	0,222	17,6	3,09	1,52	5,27	4,85	6,50
15	0,97	76	0,277	16,5	2,75	3,50	11,5	4,47	1,30
16	1,19	47	0,210	13,4	3,24	3,84	3,00	6,01	4,92
17	1,72	14	0,220	3,82	6,45	2,11	1,49	11,0	9,95
18	3,05	21,5	0,222	5,80	5,37	1,05	3,71	8,88	9,25

Colonne A Phase dispersée : Heptane - Benzène.
 Plateau 8 Phase continue : DMSO - Benzène.

N°	r	β %	$\bar{d}$ cm	a cm ⁻¹	V_r cm/s	N _C	P _C	10 ³ . k _C cm/s	α_C cm ² /s
1	0,825	48,5	0,20	14,55	3,34	3,13	∞	2,56	0
2	1,28	50,0	0,20	15	3,27	3,40	20,4	3,02	4,55
3	0,875	56,0	0,20	16,8	3,00	2,87	20,4	1,78	3,6
4	0,820	12,0	0,20	3,6	5,75	1,85	4,90	5,34	15
5	0,725	57,0	0,20	17	3,10	4,19	18,9	2,48	3,75
6	0,495	62,0	0,25	15	2,40	3,54	10,1	1,53	4,52

TABLEAU 8

(suite)

Colonne B
Plateau 12

Phase dispersée : DMSO - Benzène.
Phase continue : Heptane - Benzène.

N°	r	β %	$\bar{d}$ cm	a cm^{-1}	V_r cm/s	N_C	P_C	$10^3 \cdot k_C$ cm/s	α_C cm^2/s
1	2,28	25,2	0,20	7,55	9,75	1,53	4,93	4,88	40,2
2	1,77	55,5	0,20	16,65	6,76	3,41	9,87	3,65	15
3	1,41	29,0	0,25	6,90	7,00	1,58	4,43	3,30	26,2
4	1,35	30,0	0,225	7,20	6,10	1,88	5,44	3,52	20,5
5	0,87	75,0	0,30	15,0	6,24	5,94	8,90	3,93	9,20
6	1,26	73,0	0,30	14,6	6,45	3,40	12,0	2,83	8,35
7	1,37	21,0	0,25	5,04	9,58	2,37	3,67	5,75	26,6
8	0,98	69,0	0,30	13,80	6,45	3,17	13,0	2,80	7,70
9	1,48	70,0	0,20	21,0	5,00	4,34	7,40	2,35	12,7
10	1,53	18,5	0,20	4,55	7,92	1,41	3,43	3,52	17,3

TABLEAU 9

Coefficients de transfert de matière
relatifs à une goutte isolée

Heptane - Eau - Acétone

d cm	V_r^∞ cm/s	$10^4 \cdot k_C$ cm/s
0,253	11,5	20,0
0,317	12,70	21,9
0,324	12,90	21,1
0,340	14,55	25,6
0,506	13,65	22,2

Heptane - DMSO - Benzène

d cm	V_r^∞ cm/s	$10^3 \cdot k_C$ cm/s
1,7	6,13	5,65
2,3	8,85	8,50
2,68	10,0	9,40

TABLEAU 10

Comparaison de l'efficacité mesurée par la méthode
impulsionnelle et de l'efficacité mesurée en régime permanent
Colonne A Heptane - Eau - Acétone.

N°	U_D l/h	U_C l/h	β %	Q g	E_I	E_P	$100 \cdot \frac{E_I - E_P}{E_P}$
01	0	12,5	—	8,065	0,02	0,00	2
02	0	29	—	8,065	-0,01	0,00	- 1
03	87	12,5	—	8,065	0,02	0,00	2
1	87	29	61	7,25	0,394	0,406	- 3
2	87	29	61	8,065	0,389	0,406	- 4,2
3	87	29	61	8,065	0,435	0,406	7,1
4	87	29	61	2,41	0,435	0,406	7,1
5	87	29	61	4,90	0,450	0,406	10,8
6	87	12,5	66	8,065	0,562	0,556	1,1
7	74	29	64	8,065	0,380	0,323	17,6
8	74	29	64	8,065	0,350	0,323	8,4
9	98	12,5	62	8,065	0,676	0,635	6,4
10	112	12,5	57	8,065	0,749	0,760	- 1,5
11	62	29	10	8,065	0,217	0,276	- 21
12	62	46	12	8,065	0,150	0,154	- 2,6
13	62	12,5	8	8,065	0,523	0,477	9,6
14	74	12,5	12,5	8,065	0,478	0,470	1,7
15	74	29	13	8,065	0,296	0,282	5
16	87	12,5	18	8,065	0,523	0,477	9,6
17	87	29	16	8,065	0,229	—	—
18	98	12,5	22	8,065	0,525	0,525	0
19	98	29	26	8,065	0,346	—	—
20	98	29	26	8,065	0,360	—	—
21	98	29	26	8,065	0,444	—	—
22	98	29	26	8,065	0,405	—	—
23	112	12,5	36	8,065	0,671	0,657	2,3

Kérosène - Eau - Méthyléthylcétone

D = 30 cm $\bar{d} = 0,21$ cm m = 0,65 T = 18°C

N°	U_C l/h	U_D l/h	β	$V_{\dot{r}}$ cm/s	r	E	NET	HET _m	N_C	P_C	α_C cm ² /s
1	1200	1820	0,48	2,40	1,01	0,59	1,47	1,43	8,88	0,65	185
2	1200	1820	0,10	7,69	1,01	0,48	0,94	2,72	-	-	-
3	1200	1820	0,48	2,40	1,01	0,65	1,89	1,11	8,88	1,3	92
4	1960	1480	0,445	2,70	2,04	0,43	2,14	0,98	5,67	2,1	93
5	1960	1480	0,09	7,32	2,04	0,22	0,49	5,24	-	-	-
6	1680	1580	0,10	6,96	1,64	0,265	0,53	4,80	-	-	-
7	1680	1480	0,09	7,20	1,75	0,34	0,87	2,93	-	-	-
8	1680	1480	0,50	2,49	1,75	0,49	2,26	0,93	6,85	2,15	78
9	1610	1730	0,47	2,65	1,43	0,58	2,53	0,82	7,14	2,6	62
10	1610	1730	0,105	7,19	1,43	0,41	0,99	2,56	-	-	-
11	1610	1730	0,47	2,65	1,43	0,53	1,86	1,13	7,14	1,7	95
12	1160	1730	0,57	2,26	1,03	0,68	2,23	0,94	10,3	1,8	65
13	1360	1730	0,52	2,43	1,21	0,62	2,20	0,96	8,6	1,85	74
14	1870	11730	0,40	2,93	1,66	0,45	1,54	1,37	5,79	0,9	208
15	1870	1450	0,48	2,61	1,98	0,46	2,66	0,79	6,18	3,0	62
15	1610	1450	0,55	2,45	1,71	0,52	2,72	0,77	7,73	2,9	56
17	2120	1450	0,43	2,79	2,25	0,38	1,79	1,17	5,23	1,5	141
18	1610	2020	0,37	3,16	1,23	0,56	1,66	1,26	6,70	1,2	134
19	1360	2020	0,42	2,82	1,04	0,65	1,96	1,07	8,04	1,5	91
20	1610	1450	0,09	7,04	1,71	0,25	0,50	5,07	-	-	-
21	1610	1730	0,105	7,19	1,43	0,31	0,60	4,24	-	-	-
22	1610	2020	0,13	6,85	1,23	0,30	0,50	5,07	-	-	-

TABLEAU 12

Kérosène - Eau - Méthyléthylcétone D = 15,5 cm $\bar{\alpha} = 0,21$ cm m = 0,61 T = 14 - 15°C

N°	U _C l/h	U _D l/h	β	V _r cm/s	r	E	NET	HET _m	N _C	P _C	α_C cm ² /s
1	330	525	0,50	2,50	1,03	0,64	1,86	0,89	6,64	1,45	65
2	330	525	0,50	2,50	1,03	0,635	1,81	0,91	6,64	1,35	70
3	430	410	0,49	2,55	1,72	0,53	3,07	0,54	4,90	4,5	28
4	330	410	0,57	2,18	1,31	0,59	2,22	0,74	6,58	2,15	44
5	200	410	0,65	1,75	0,80	0,795	2,57	0,64	10,0	2,4	24
6	430	300	0,56	2,20	2,35	0,41	3,30	0,50	5,04	4,0	31
7	540	410	0,45	2,75	2,16	0,45	3,77	0,44	4,04	8,9	18
8	645	410	0,40	3,09	2,58	0,37	2,80	0,59	3,33	5,0	37
9	200	640	0,49	2,50	0,51	0,83	1,82	0,90	10,7	1,1	52
10	330	640	0,38	3,26	0,85	0,685	1,72	0,95	6,54	1,25	76
11	430	410	0,14	5,02	1,72	0,41	1,28	1,52	2,86	0,7	176
12	430	300	0,08	6,20	2,35	0,32	1,18	1,65	2,01	0,6	205
13	645	300	0,09	6,08	3,52	0,235	1,19	1,64	1,44	0,7	262
14	645	410	0,16	4,85	2,58	0,315	1,37	1,43	2,11	1,0	184
15	200	410	0,12	5,36	0,80	0,65	1,41	1,38	5,60	0,75	77
16	330	525	0,18	4,88	1,03	0,57	1,37	1,42	4,63	0,75	126
17	330	640	0,33	3,58	0,85	0,64	1,45	1,34	6,23	0,8	118
18	200	640	0,24	4,31	0,51	0,715	1,19	1,63	9,01	0,25	230
19	200	640	0,24	4,31	0,51	0,72	1,21	1,60	9,01	0,3	191
01	435	0				- 0,002					
02	435	0				- 0,014					

Efficacités globales des colonnes à pulvérisation en lit lâche et en lit dense.

Systèmes	D cm	LIT DENSE			LIT LACHE			Observations Références	L m
		HET moy- enne	HET mini- male	HET maxi- male	HET moy- enne	HET mini- male	HET maxi- male		
Heptane - Eau Acétone Heptane - DMSO Benzène DMSO - Heptane Benzène	5	0,30	0,19	0,42	0,60	0,46	0,76	Partie III	0,84 0,84 0,91
Kérosène - Eau Méthyléthyl cétone	15,5	0,71	0,44	0,95	1,34	1,52	1,65	Partie IV	1,95 lit lâche 1,65 lit dense
Kérosène - Eau Méthyléthyl cétone	30	1,06	0,77	1,43		2,56	5,24	Partie IV	2,55 lit lâche 2,10 lit dense
Kérosène - Eau Chaleur	7,4	0,17	0,13	0,23	0,64	0,32	1,13	[8] r = 1	1,33 et 0,76
Kérosène - Eau Chaleur	15	0,45	0,31	0,67	1,10	0,82	1,80	[6]	2,13 et 3,05
Kérosène - Eau Chaleur	40				2,30	1,80	4,00	[1]	4,00
Gasoil - Eau Chaleur	40				2,70	2,30	3,65		4,40
Kérosène - Eau Chaleur	4				0,42	0,21	0,67		0,80
Méthylisobutyl cétone Eau Acide acétique	3,8				0,57 1,05	0,42 0,90	0,78 1,16	[2] Transfert C→D Transfert D→C	1,16

TABLEAU 14

Symbole	Auteurs	Liquides utilisés	D cm	$\bar{d}$ cm	D / $\bar{d}$	Méthode de mesure
ϕ -	J. Henton S. Cavers [3]	Méthylisobutylcétone - Eau	3,3 7,6	0,24 - 0,39 0,34	10 - 16 22	Profils de traceur salin
A	S. Cavers Swarczyna [2]	Méthylisobutylcétone - Eau - Acide acétique	3,3	0,25	15	Profils en transfert de matière
•	R. Loutaty E. Le Goff [9]	Kérosène - Eau	7,4	0,31 - 0,44	17 - 24	Profils en transfert de chaleur
-	Mouton [10]	Kérosène - Eau	7,4	0,41 - 0,51	14 - 19	Impulsion de traceur salin
Δ ∇ o	Perrut Partie III	Heptane - DMSO - Benzène DMSO - Heptane - Benzène Heptane - Eau - Acétone	5,0	0,2 - 0,3	17 - 25	Profils en transfert de matière
ϕ	Dulau [5]	Kérosène - Eau	7,4	0,128	58	Profils en transfert de chaleur
$\square$ ■	Perrut Partie IV	Kérosène - Eau - Méthyléthylcétone	15,5 30	0,21 0,21	74 143	Mesure de l'efficacité et évaluation de N_C

TABLEAU 15

Symbole	Systèmes utilisés		$\bar{s}$ cm ⁻¹	$\bar{s}^*$ cm ⁻¹	$M_{SC} = \frac{k_C}{V r}$
◆	Heptane - Eau	Acétone	0,0139	0,0124	1,7.10 ⁻⁴
▼	DMSO - Heptane	Benzène	0,0354	0,0344	5,0.10 ⁻⁴
■	Méthylisobutylcétone - Eau	Acide acétique [2]	0,0315	0,0233	5,4.10 ⁻⁴
▲	Heptane - DMSO	Benzène	0,0566	0,0662	9,3.10 ⁻⁴
●	Kérosène - Eau	Chaleur [8]	0,050	0,059	9,6.10 ⁻⁴

Sur la Figure 58, les symboles pleins correspondent à $\bar{s}$ et les symboles vides à $\bar{s}^*$.

TABLEAU A1

Dépouillement des résultats de Cavers et Ewanchyna.

N°	r	β %	V_r cm/s	N_C	P_C	$10^3 \cdot k_C$ cm/s	α_C cm ² /s	Sens du transfert
23	2,08	3,4	9,27	1,39	5,36	5,23	7,8	C → D
24	1,35	6,7	7,98	2,09	5,24	4,02	8,0	
27	0,94	11,0	7,20	3,02	4,43	3,54	9,4	
30	2,64	6,5	8,70	1,09	6,19	4,50	14	
31	0,63	6,7	7,84	3,97	2,05	4,40	10,1	
39	4,46	1,7	9,37	0,69	4,03	5,30	7,8	
41	1,98	11,9	7,11	1,83	8,66	3,95	9,6	
43	0,33	8,1	6,4	8,97	2,47	3,82	4,5	
35	2,38	—	—	0,70	3,14	—	13,4	D → C
37	1,43	—	—	1,16	3,73	—	11,3	
40	0,98	—	—	1,75	3,68	—	11,3	
42	2,82	—	—	0,55	6,02	—	1,38	
44	0,93	—	—	2,04	1,68	—	35,4	

TABEAU A2

Mesure du coefficient de transfert de matière pour une goutte isolée évoluant en milieu infini.

Heptane - Eau - Acétone.

d_{cm}	τ_s	C_{DE} g/l	V_r^∞ cm/s	$10^4 \cdot k_D / V_r$	$10^4 \cdot k_C / V_r$	$10^4 \cdot k_C$ cm/s
0,253	0,4	150	11,50	15,8	1,74	20,0
0,317	0,4	146	12,70	15,7	1,72	21,9
0,324	0,4	140	12,90	14,85	1,63	21,1
0,340	0,6	190	14,55	16,0	1,76	25,6
0,506	0,4	182	13,65	14,8	1,63	22,2

Heptane - DMSO - Benzène.

d_{cm}	τ_s	C_{DE} g/l	V_r^∞ cm/s	$10^4 \cdot k_D / V_r$	$10^4 \cdot k_C / V_r$	$10^3 \cdot k_C$ cm/s
1,78	0,4	306	6,13	5,18	9,22	5,65
2,30	0,4	306	8,85	5,40	9,60	8,50
2,68	0,4	306	10,0	5,28	9,40	9,40

TABLEAU A3

Type d'équipement	Diamètre cm	Hauteur cm	Phase dispersée	W cm/s limite utilisation		HET cm	$\frac{W}{HET} \cdot 10^2$ s ⁻¹
colonne à pulvérisation	3,1	92	solvant	4,72	3,78	81,5	4,65
colonne à garnissage	3,1	92	charge	0,925	0,728	57,5	1,26
colonne à injecteur	3,1	79	les deux	3,35	1,83	38,5	4,80
colonne à disques rotatifs	4,9	64	solvant	1,15	0,92	19,4	4,75
colonne à plateaux perforés	4,9	64	solvant	1,85	1,50	42,5	3,50
colonne à plateaux perforés avec débits pulsés	4,9	64	solvant	1,95	1,33	21,2	6,30

TABLEAU A4

Colonne A Phase dispersée : Heptane - Acétone.

Plateau 11 Phase continue : Eau - Acétone.

N°	r	β %	NET	HET cm	W cm/s	$\frac{W}{HET} \cdot 10^2$ s ⁻¹	Régime
1	1,79	63	2,7	31	1,93	6,20	dense
2	2,02	32	1,3	65	1,93	2,96	lâche
3	1,60	49	2,0	42	2,18	5,20	dense
4	2,06	67	2,0	42	1,73	4,12	dense
5	1,20	74	4,5	19	1,56	8,20	dense
6	1,32	26	1,3	65	1,56	2,40	lâche
7	1,59	70	3,2	26	1,40	5,40	dense
8	2,49	62	2,7	31	1,63	5,25	dense
9	1,03	32	2,0	42	1,75	4,20	lâche
10	1,27	64	3,2	26	1,56	6,00	dense
11	3,23	13	1,8	47	1,30	2,75	lâche
12	5,75	14	1,3	65	1,50	2,31	lâche
13	1,30	67	3,8	22	1,22	5,55	dense
14	2,83	65	2,1	40	1,45	3,62	dense
15	0,97	76	3,0	28	1,75	6,25	dense
16	1,19	47	2,3	37	1,56	4,20	dense
17	1,72	14	1,5	56	1,05	1,88	lâche
18	3,05	21,5	1,8	47	1,45	3,10	lâche

TABLEAU A4

(suite)

Colonne A Phase dispersée : Heptane - Benzène.
 Plateau 8 Phase continue : DMSO - Benzène.

N°	r	β %	NET	HET cm	W cm/s	$\frac{W}{HET} \cdot 10^2$ s ⁻¹	Régime
1	0,815	48,5	4,2	20	1,68	8,40	dense
2	1,28	50	2,5	34	1,63	4,80	dense
3	0,875	56	2,4	35	1,45	4,14	dense
4	0,820	12	1,6	53	1,45	2,74	lâche
5	0,870	57,0	3,5	24	1,47	6,13	dense
6	0,495	62,0	2,0	42	1,15	2,74	dense

Colonne B Phase dispersée : DMSO - Benzène.
 Plateau 12 Phase continue : Heptane - Benzène.

N°	r	β %	NET	HET cm	W cm/s	$\frac{W}{HET} \cdot 10^2$ s ⁻¹	Régime
1	2,28	25,2	1,5	60	3,90	6,50	lâche
2	1,77	55,5	3,2	29	3,34	11,5	dense
3	1,40	29,0	1,2	76	2,78	3,66	lâche
4	1,35	30,0	2,0	46	2,74	5,95	lâche
5	0,87	75,0	3,4	27	2,88	10,6	dense
6	1,26	73,0	2,9	32	2,84	8,86	dense
7	1,37	21,0	1,8	50	2,84	5,66	lâche
8	0,98	69,0	2,3	40	3,20	8,0	dense
9	1,48	70,0	3,0	30	2,10	7,0	dense
10	1,53	18,5	1,2	76	2,26	2,97	lâche

FIGURES

- Première Partie 1 - 22
- Deuxième Partie 23 - 31
- Troisième Partie 32 - 45
- Quatrième Partie 46 - 54
- Cinquième Partie 55 - 58
- Annexes A 1 - A 11

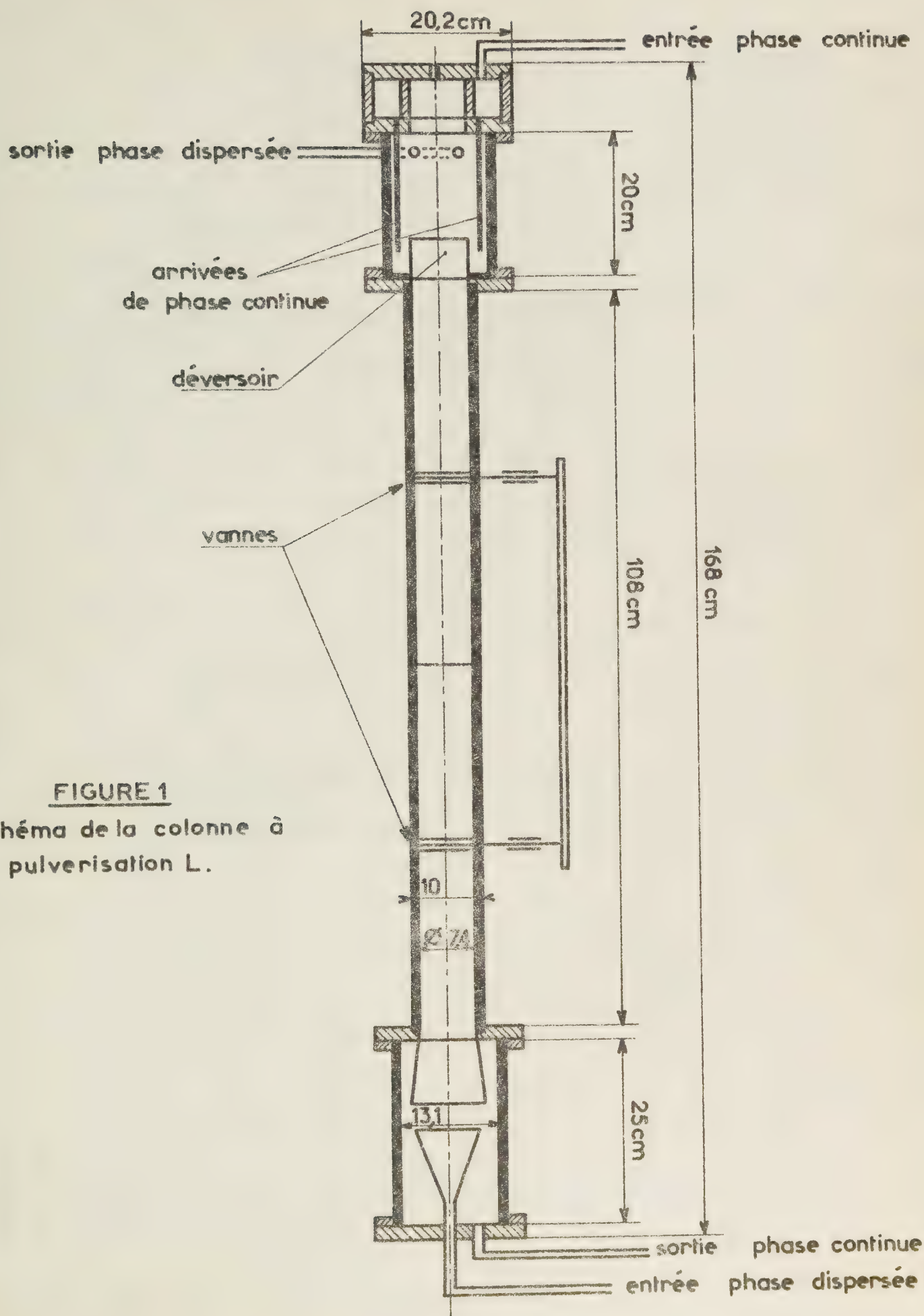


FIGURE 1

Schéma de la colonne à
pulvérisation L.

Schéma de l'appareil d'extraction liquide-liquide (colonnes A et B).

D Débitmètre

R Réservoir

V Vanne à boule

⊗ Robinet

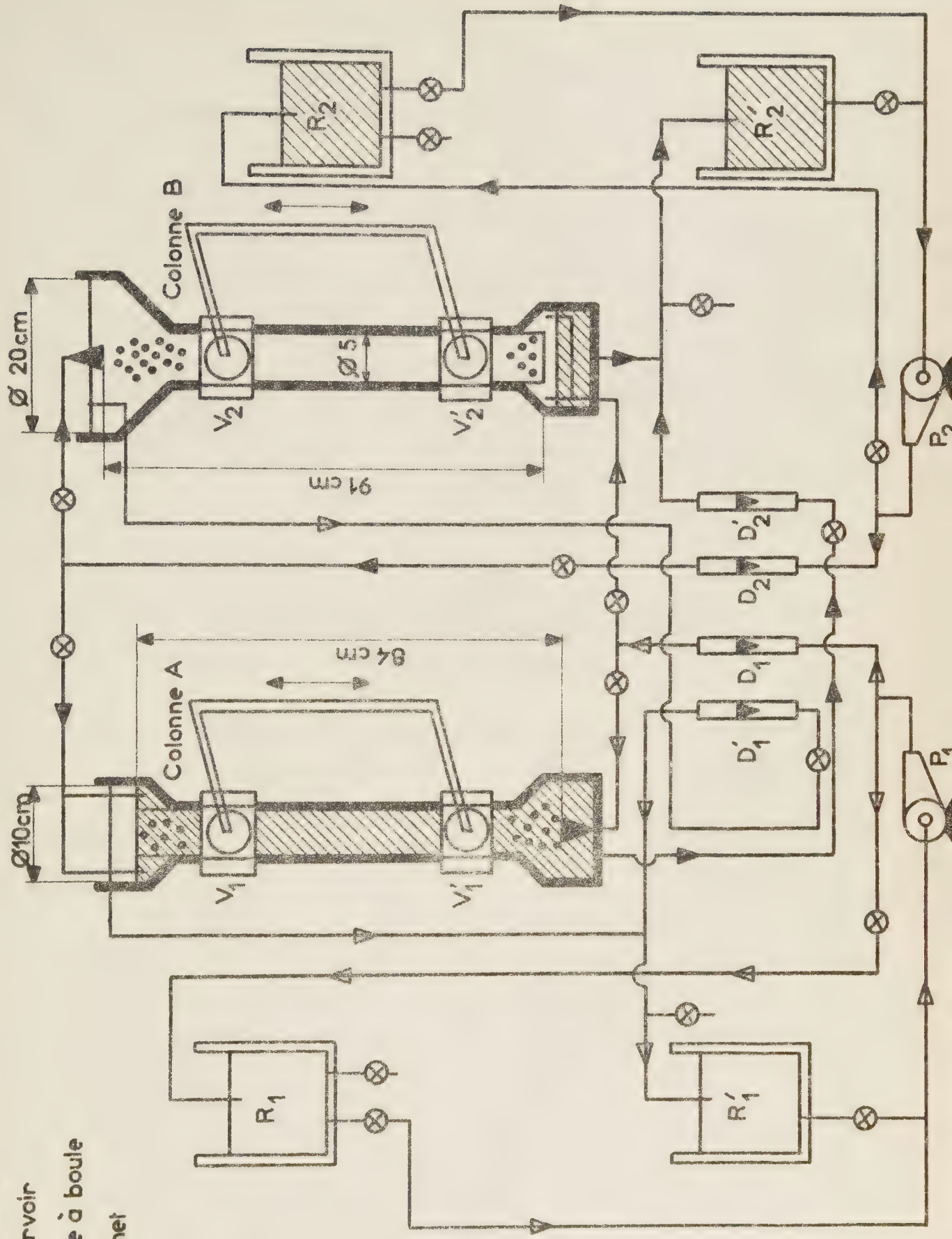


FIGURE 3

Schéma de montage pour la photographie des gouttes.

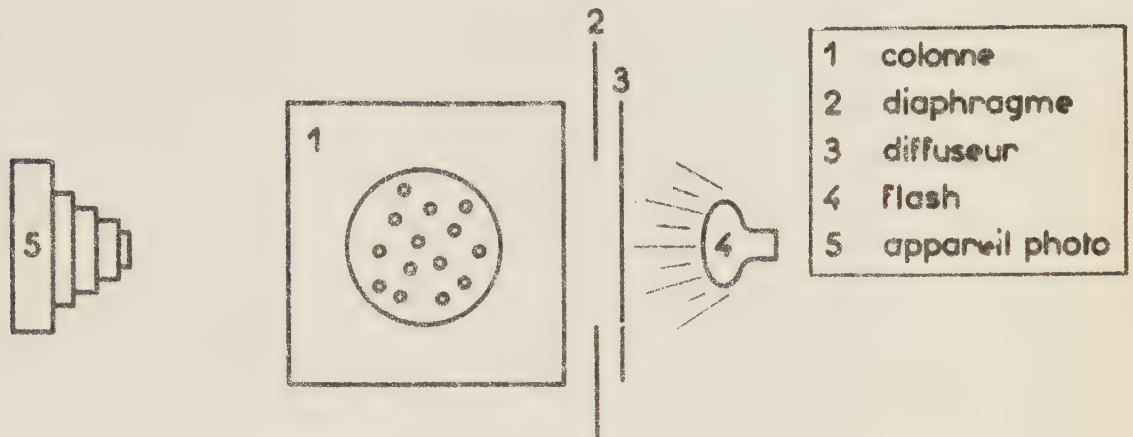


FIGURE 5

Distributeur de la taille des gouttes :
Couple 8 et plateau 10.

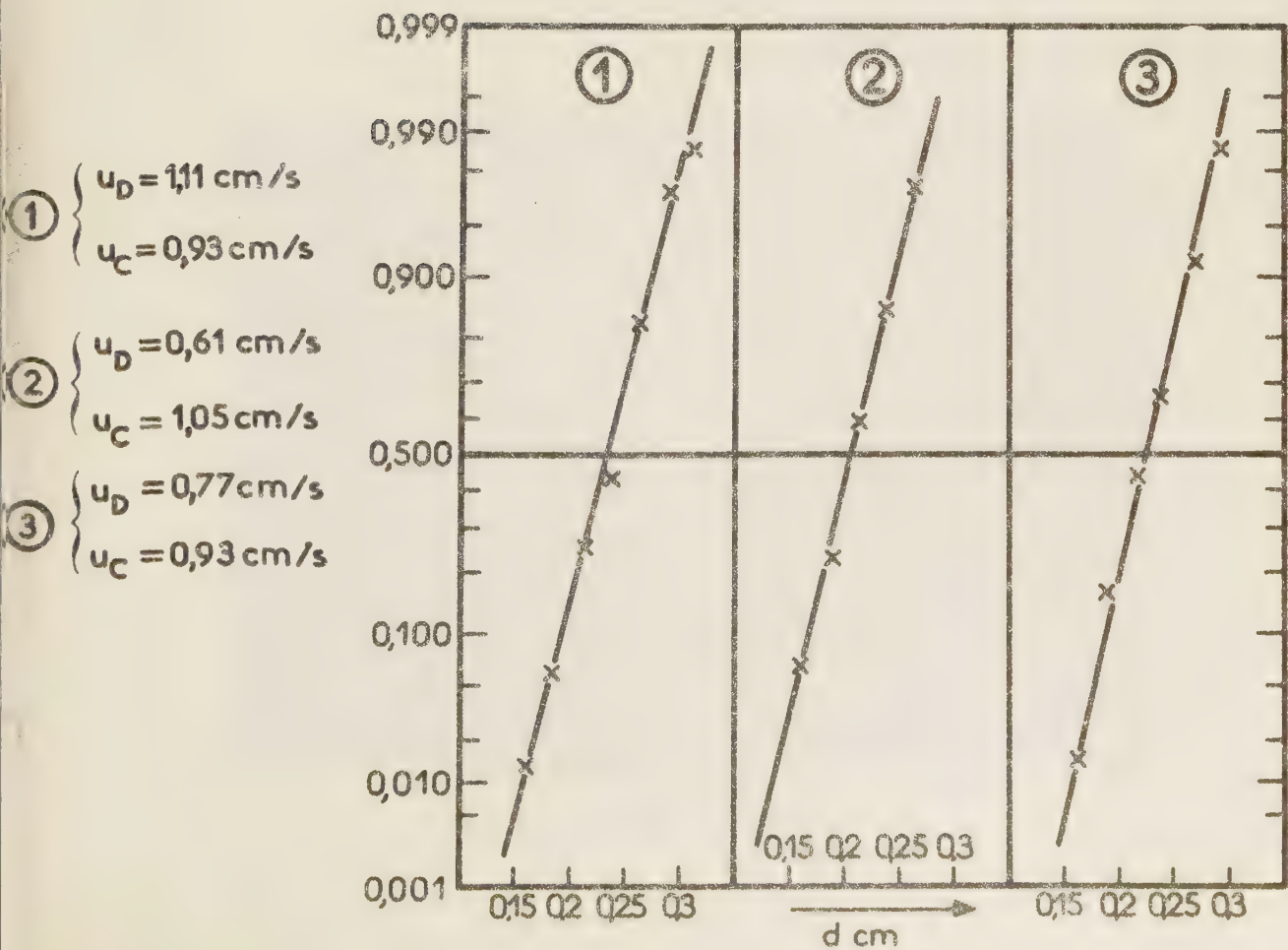
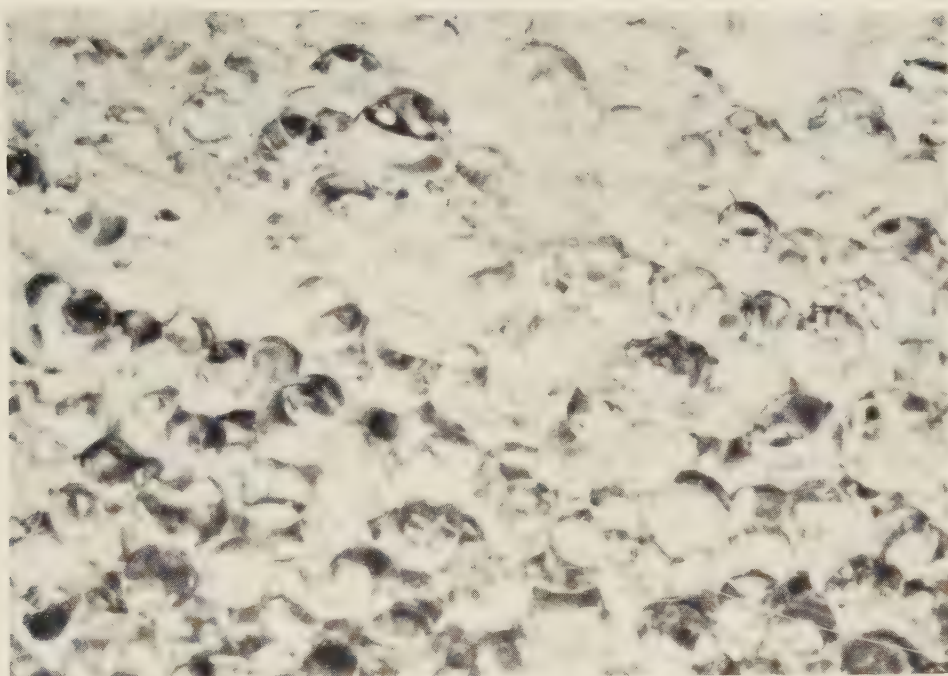


FIGURE 4

PHOTOGRAPHIES DU LIT DENSE



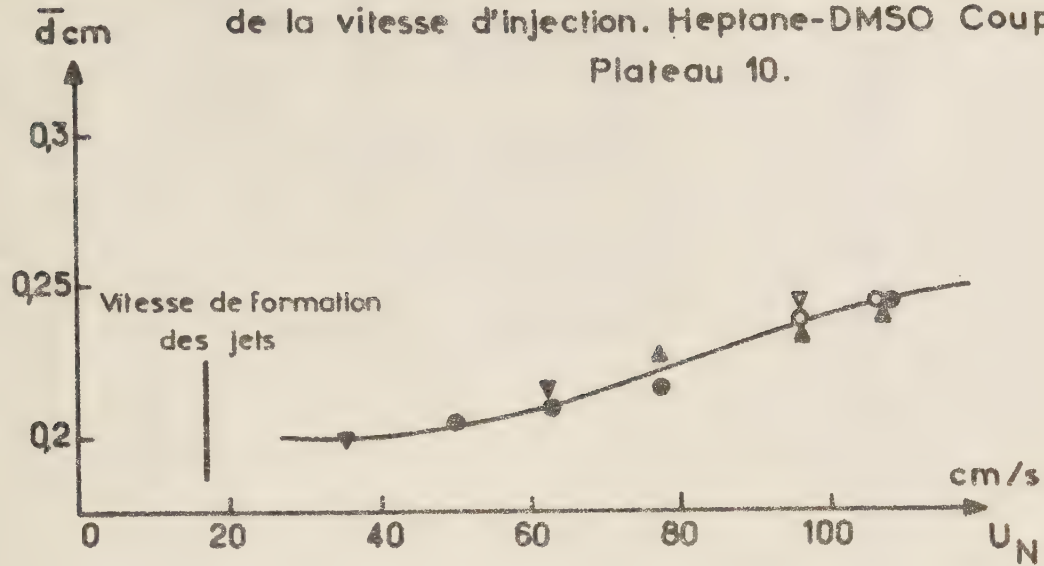
COUPLE 6 HEPTANE-EAU ↑



COUPLE 17 ETHYLENE GLYCOL-HEPTANE ↓

FIGURE 6

Variation de la taille moyenne des gouttes en fonction de la vitesse d'injection. Heptane-DMSO Couple 8. Plateau 10.



○ $U_C = 0$ cm/s

▲ $U_C = 0,93$ cm/s

● $U_C = 0,31$ cm/s

▼ $U_C = 1,05$ cm/s

▽ $U_C = 0,61$ cm/s

FIGURE 8

Variation de la taille moyenne des gouttes en fonction de la vitesse d'injection. Heptane - DMSO - Benzène. Plateau 8.

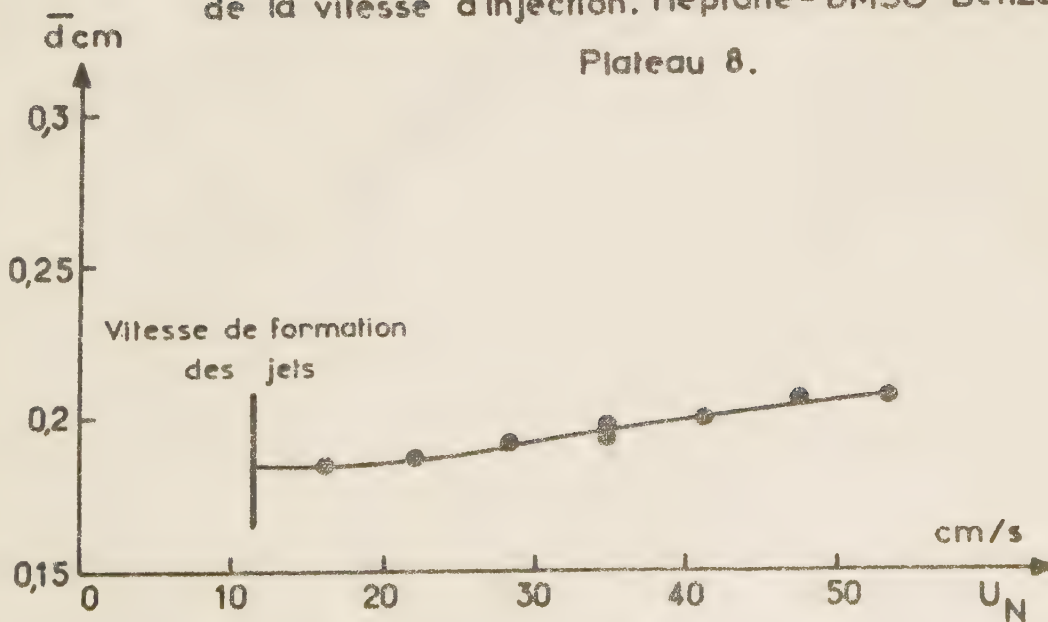


FIGURE 7

Variation du diamètre moyen des gouttes en fonction de la vitesse d'injection de la phase dispersée.

Couple 1 (Kérosène-Eau)

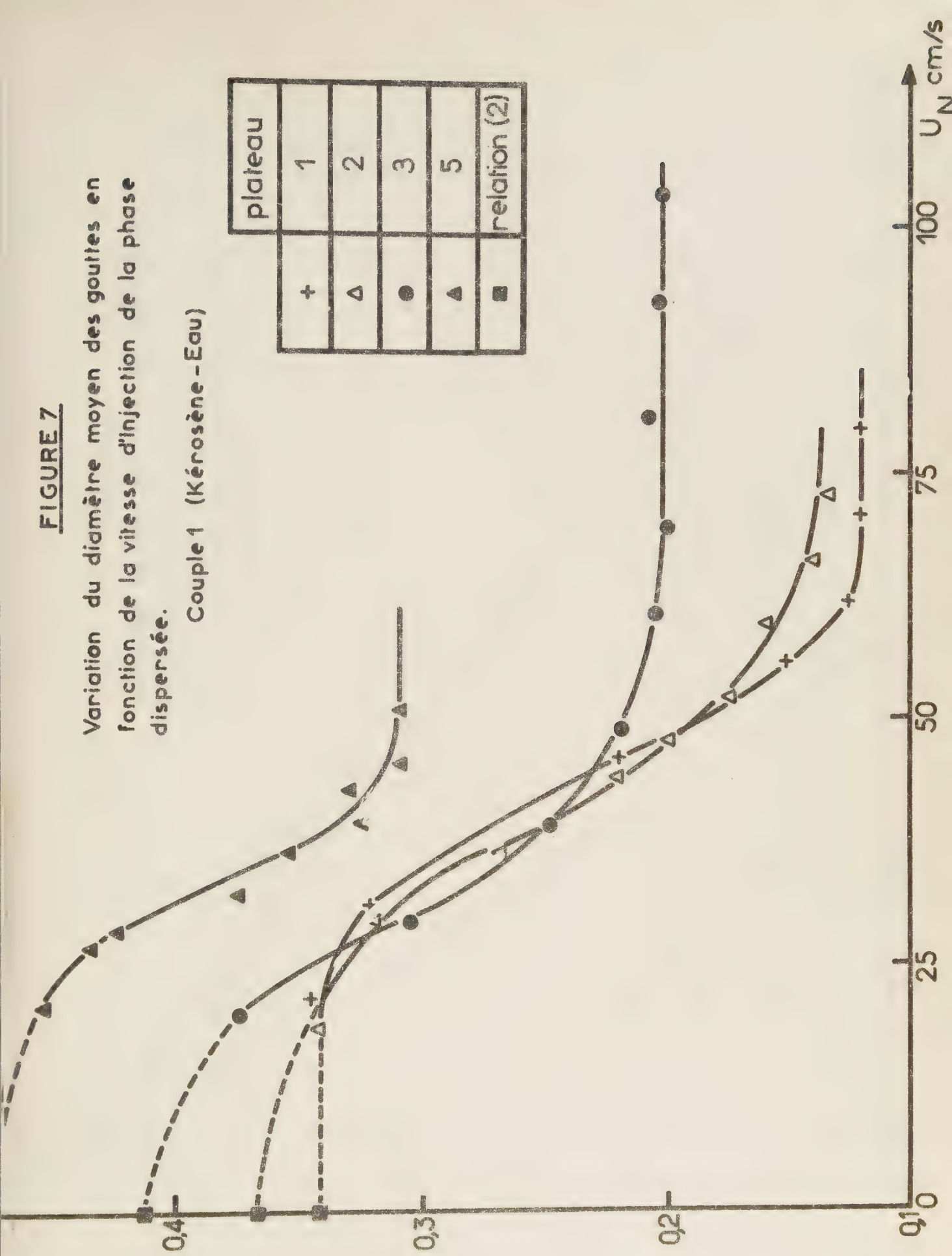


FIGURE 9

Variation du rapport $\bar{d}/\phi$ en fonction
du nombre d'Eötvös.

--- Corrélation de CHRISTIANSEN
et HIXSON [3]

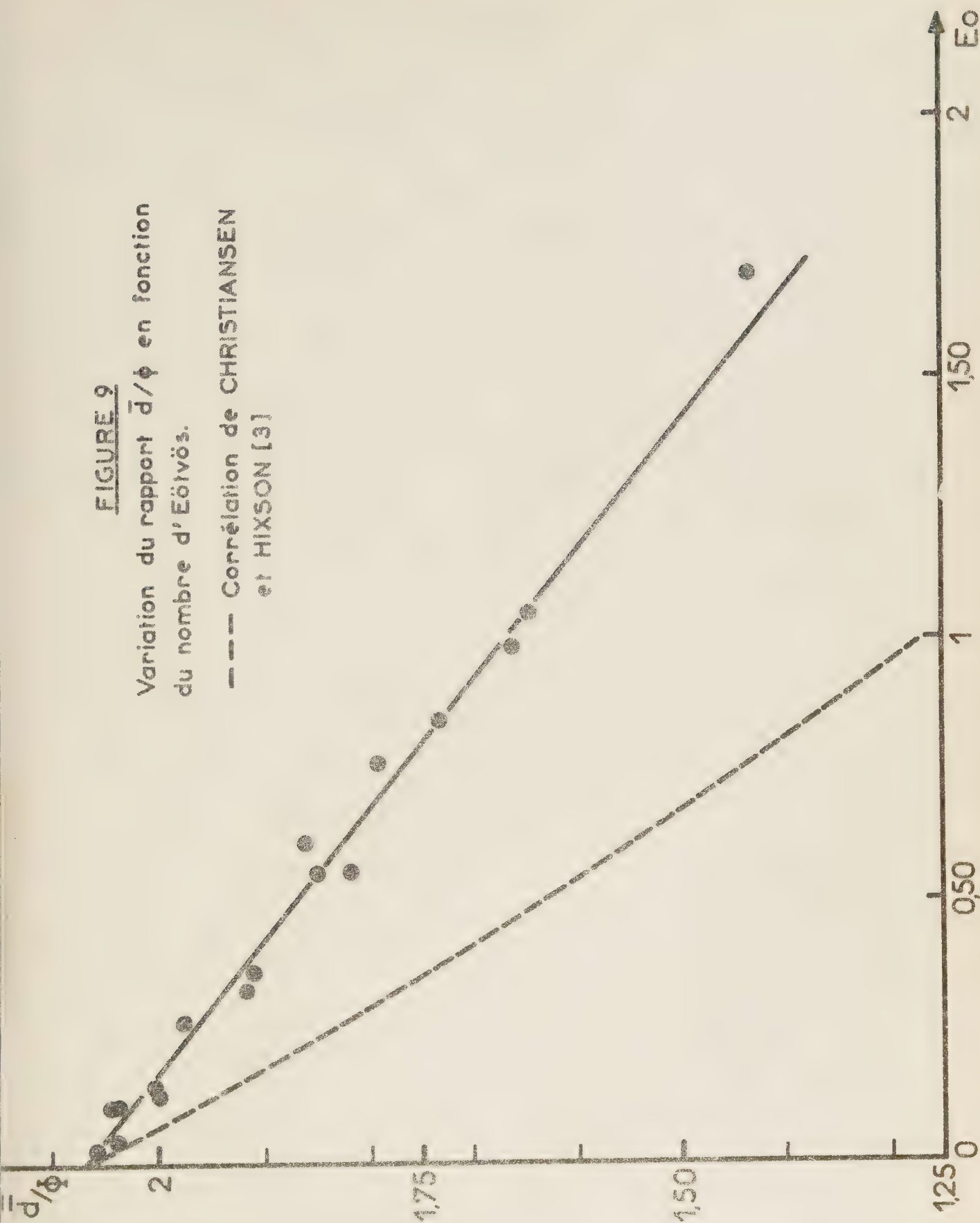
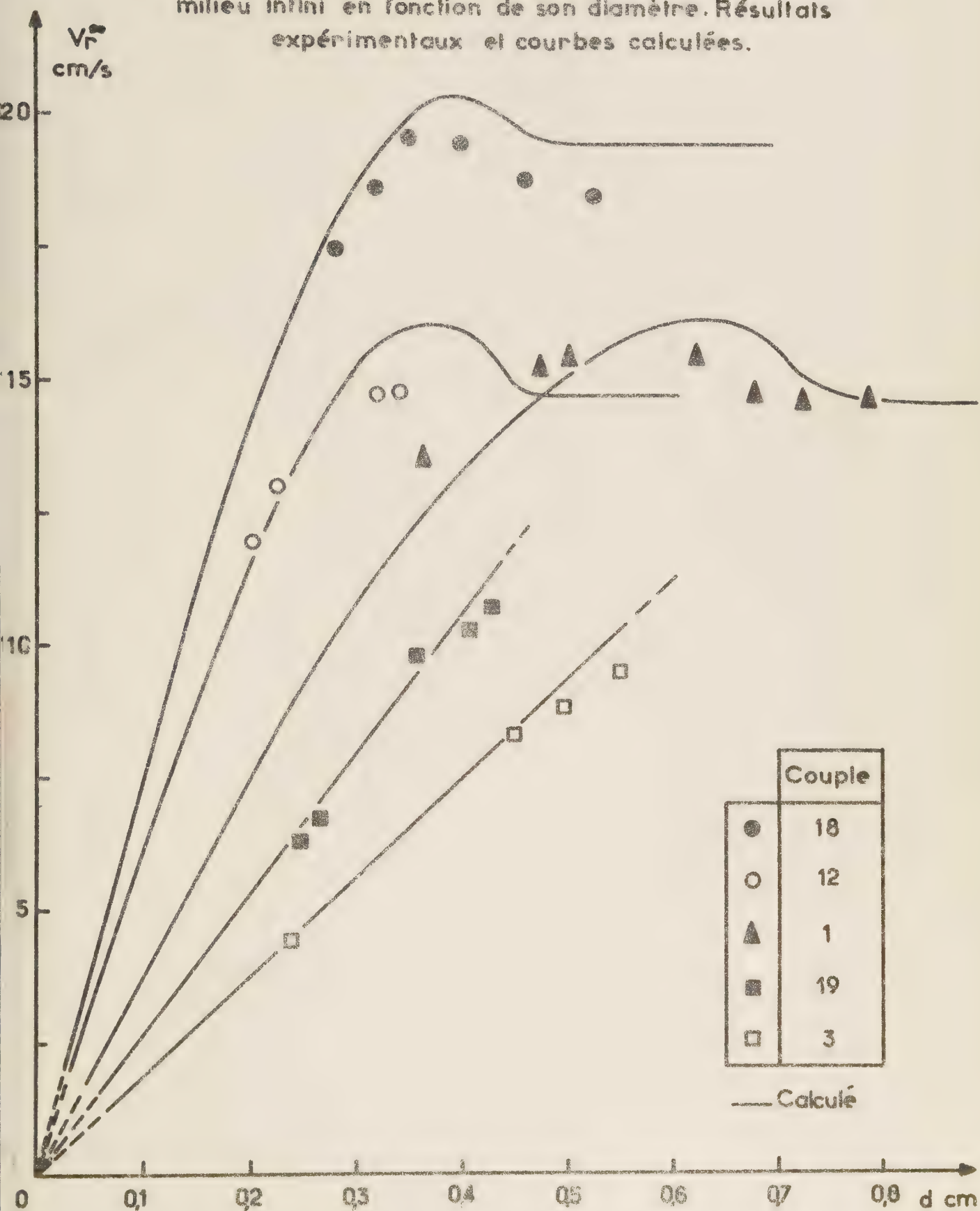


FIGURE 10

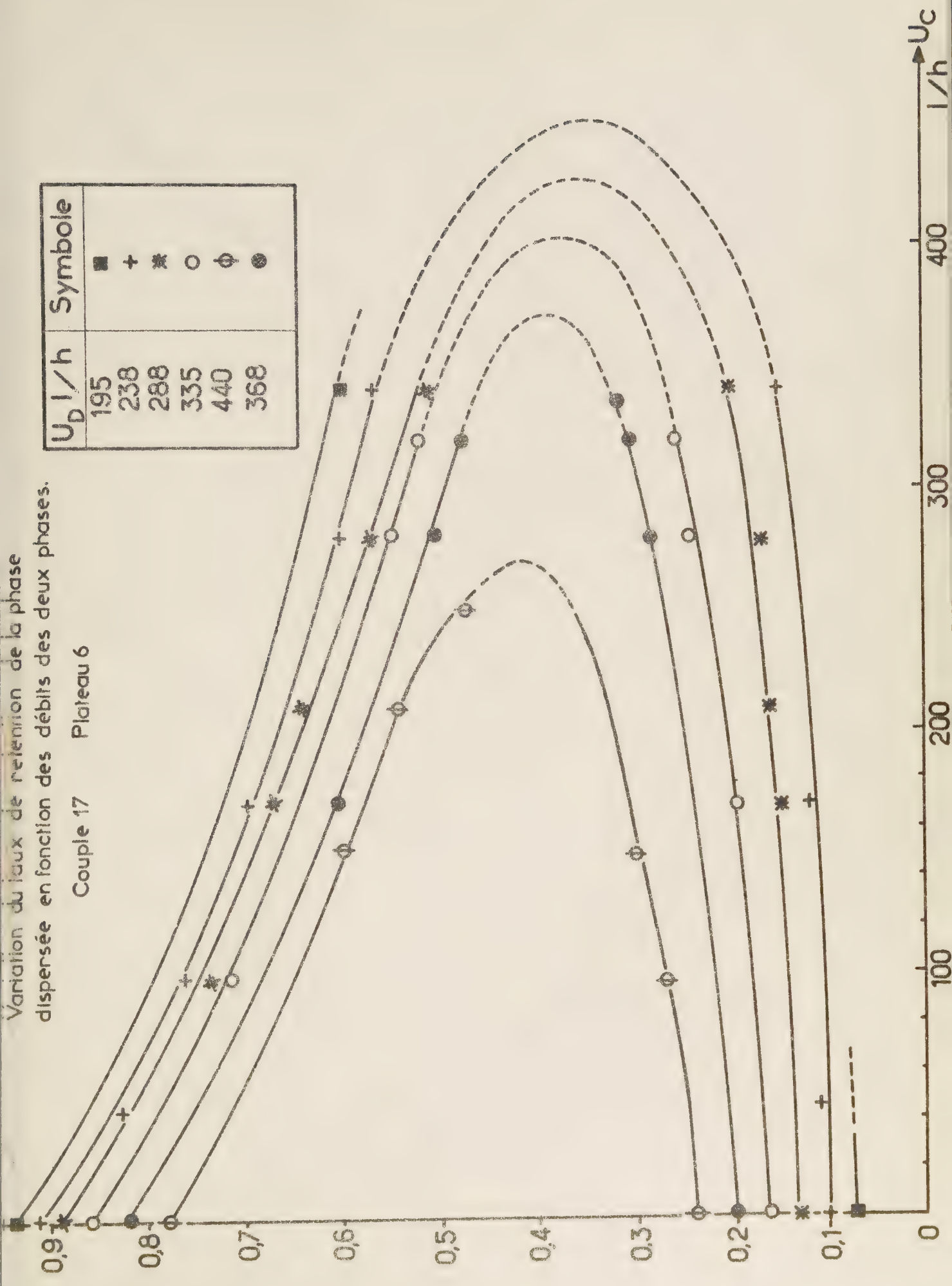
Variation de la vitesse de déplacement d'une goutte en milieu infini en fonction de son diamètre. Résultats expérimentaux et courbes calculées.

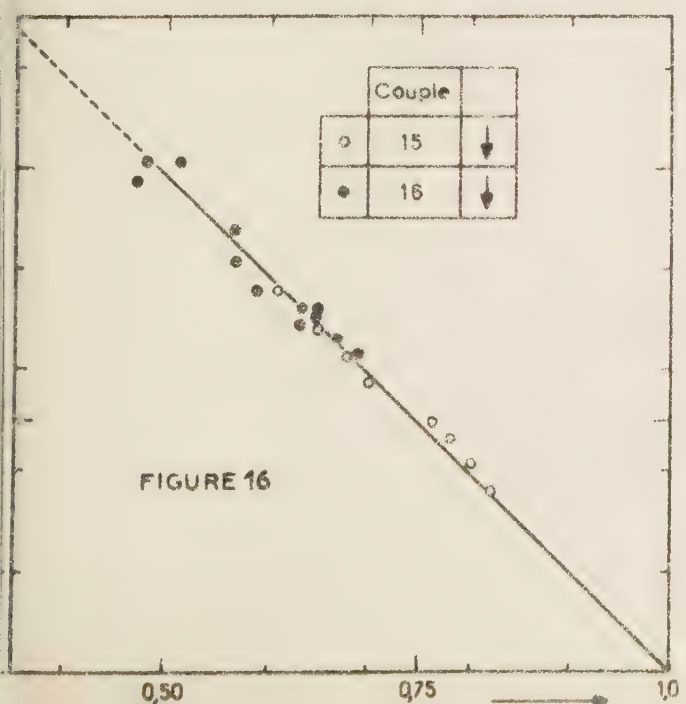
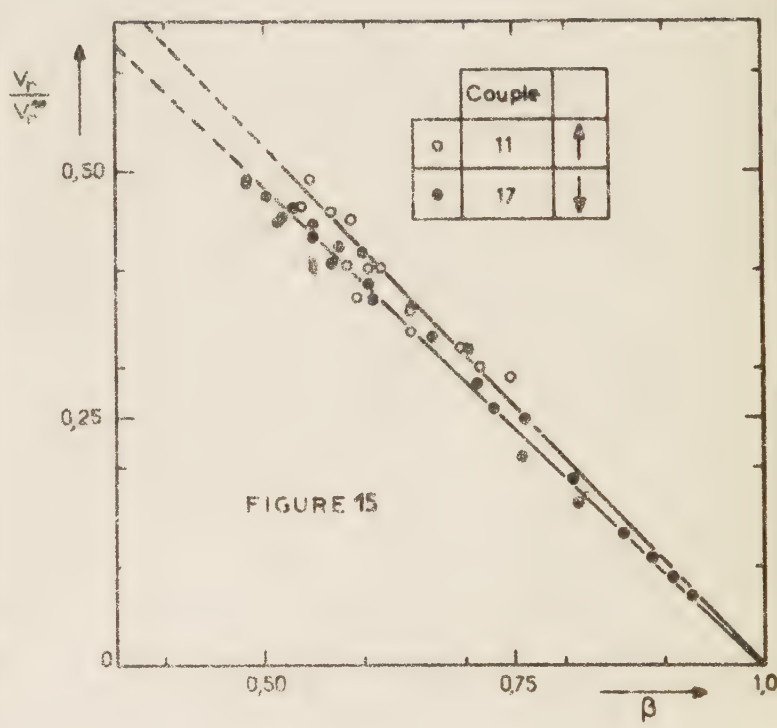
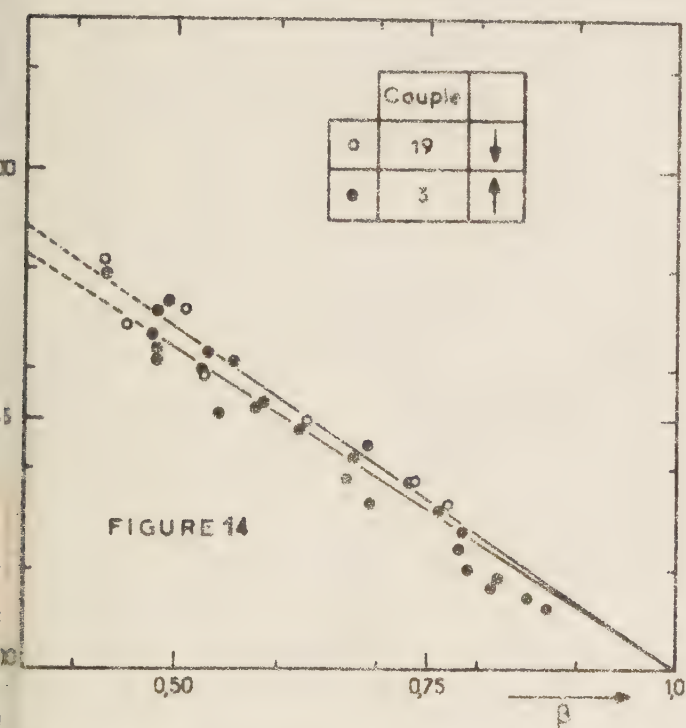
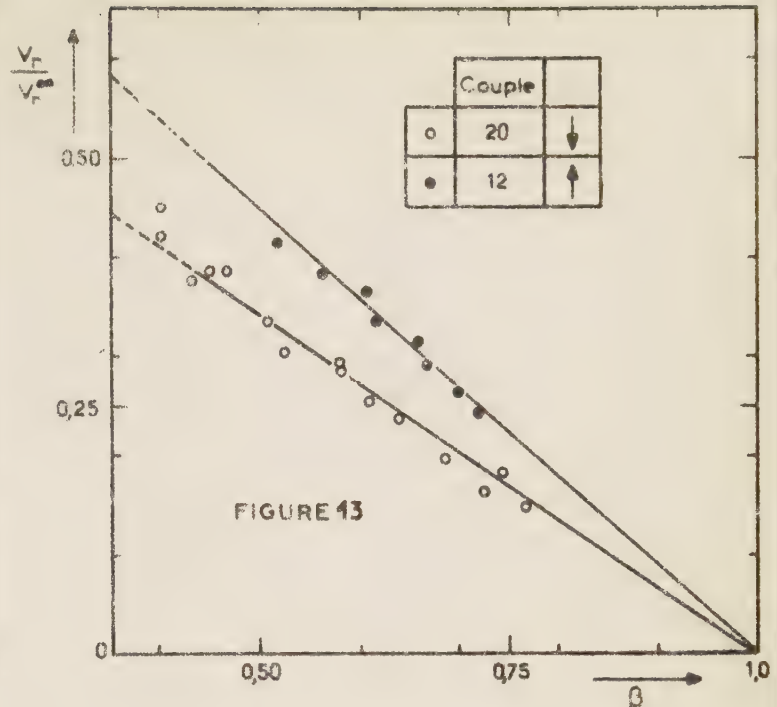
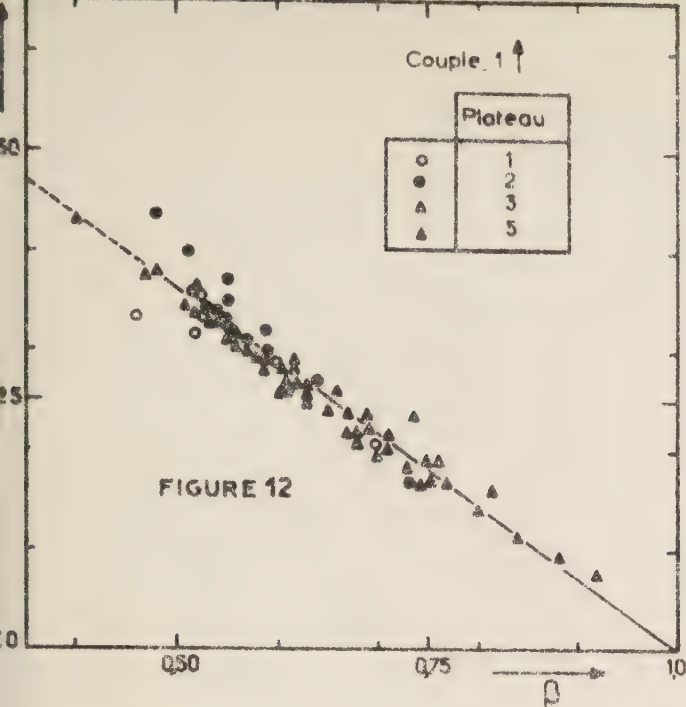


Variation du taux de rétention de la phase dispersée en fonction des débits des deux phases.

Couple 17 Plateau 6

$U_D I/h$	Symbole
195	■
238	+
288	*
335	○
440	◇
368	●



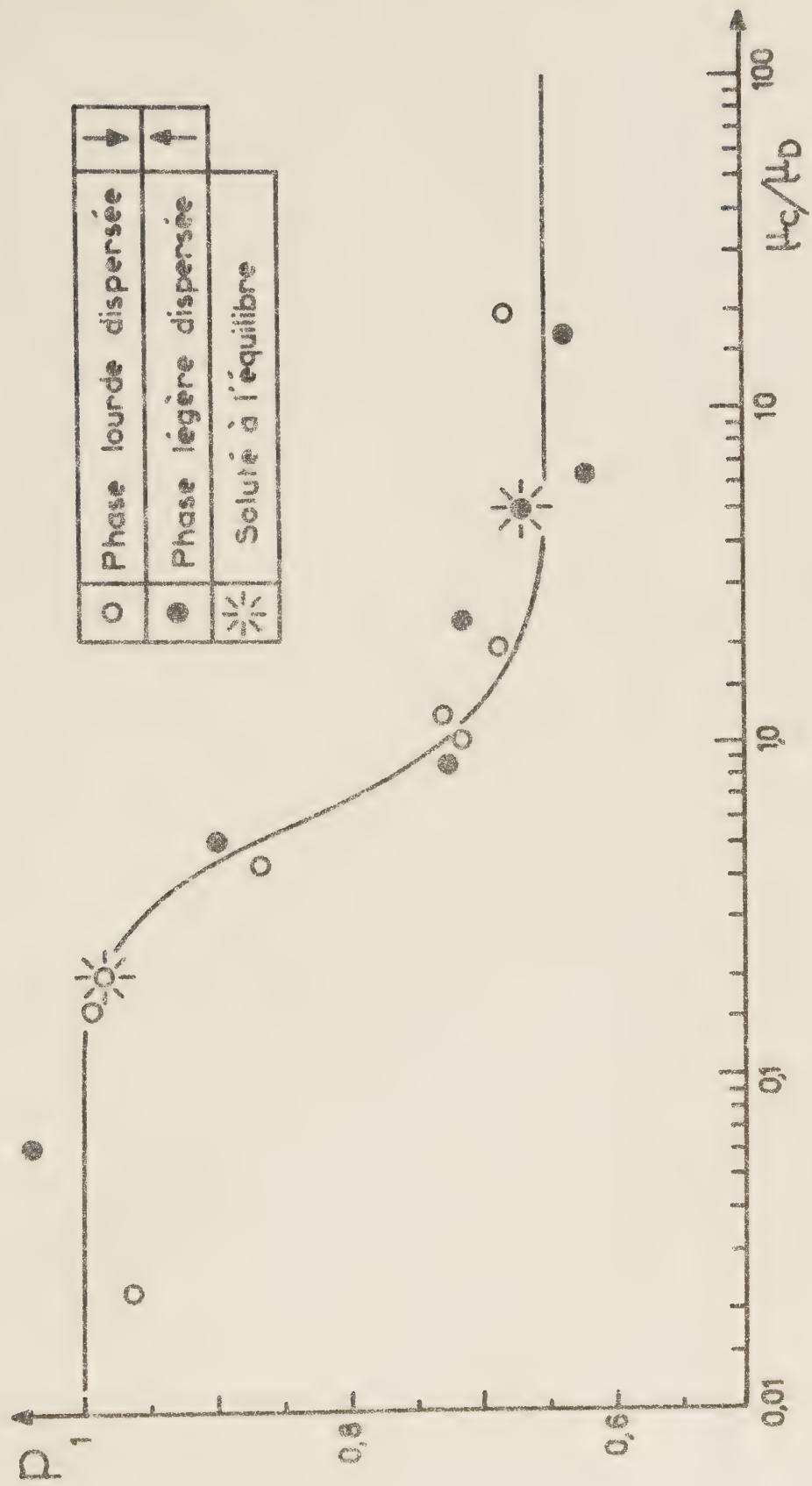


FIGURES 12,13,14,15 et 16

Variation du rapport V_r/V_r^∞ en fonction du taux de rétention β .

FIGURE 17

Variation de p en fonction du rapport des viscosités μ_c / μ_D .



	Couple	Sens
Δ	8	$\uparrow$
$\bullet$	12	$\uparrow$
$\blacktriangle$	17	$\downarrow$
∇	18	$\downarrow$
$\circ$	19	$\downarrow$

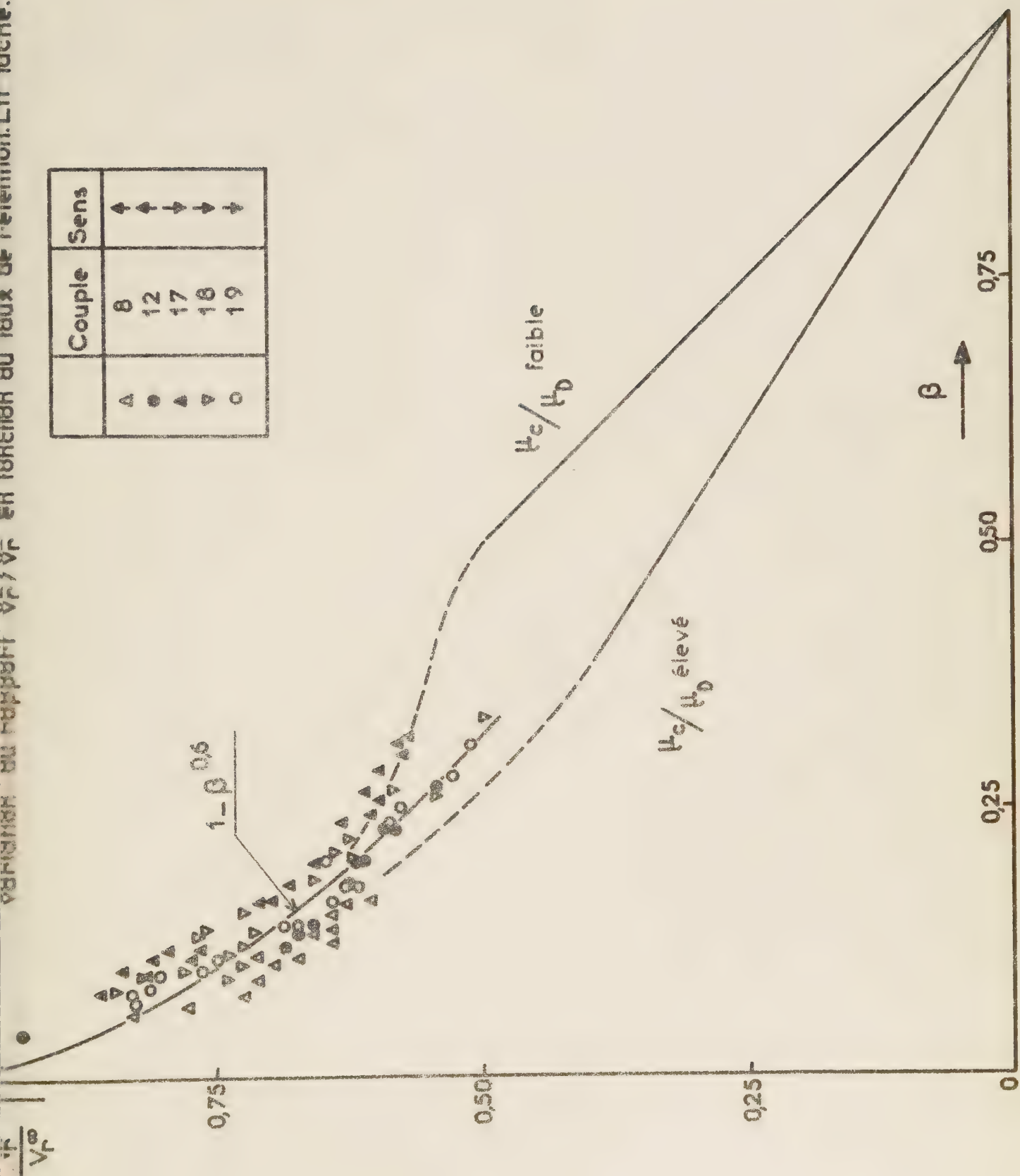


FIGURE 19
 Courbes de variation de $(1-\beta)^n$

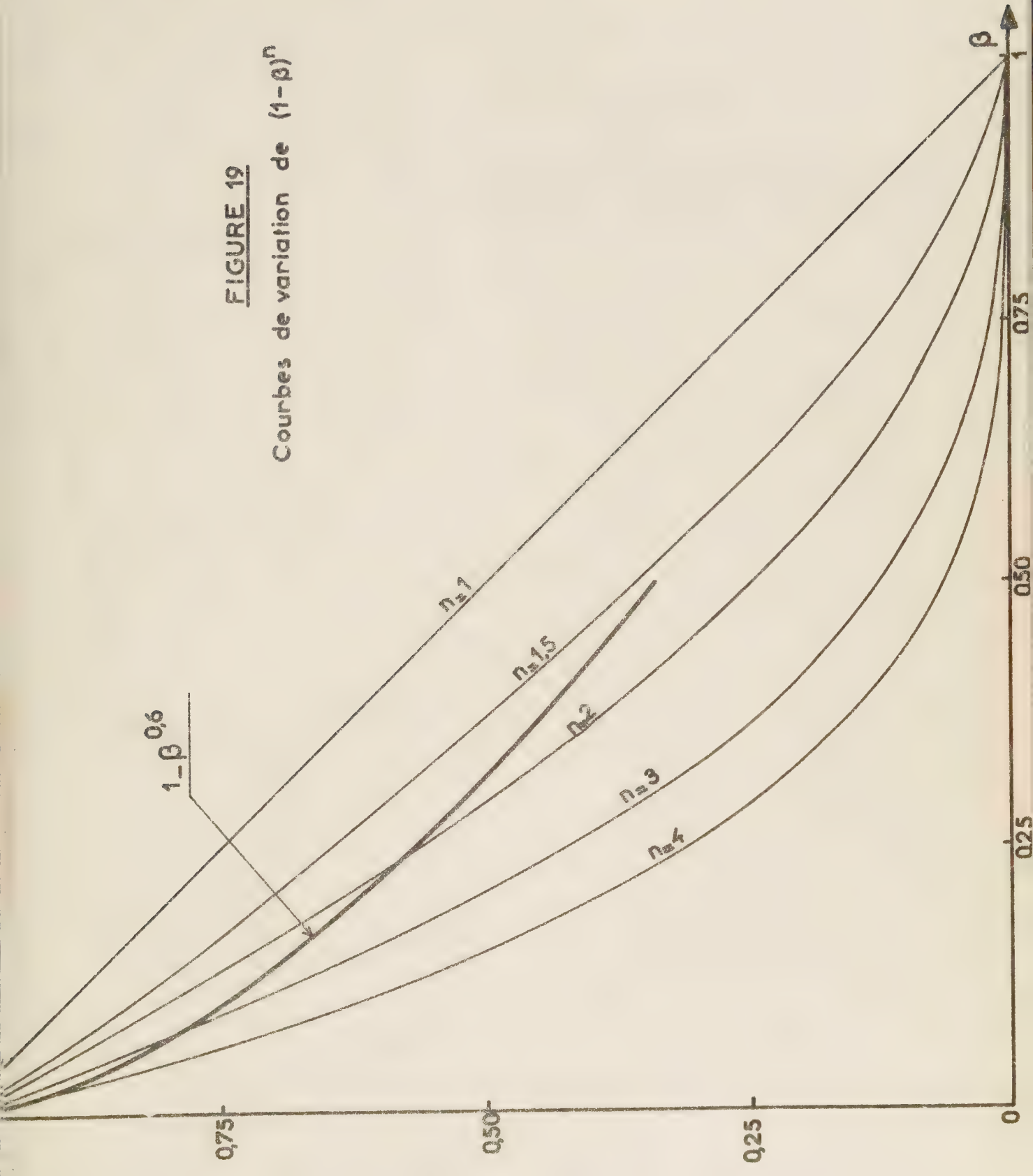
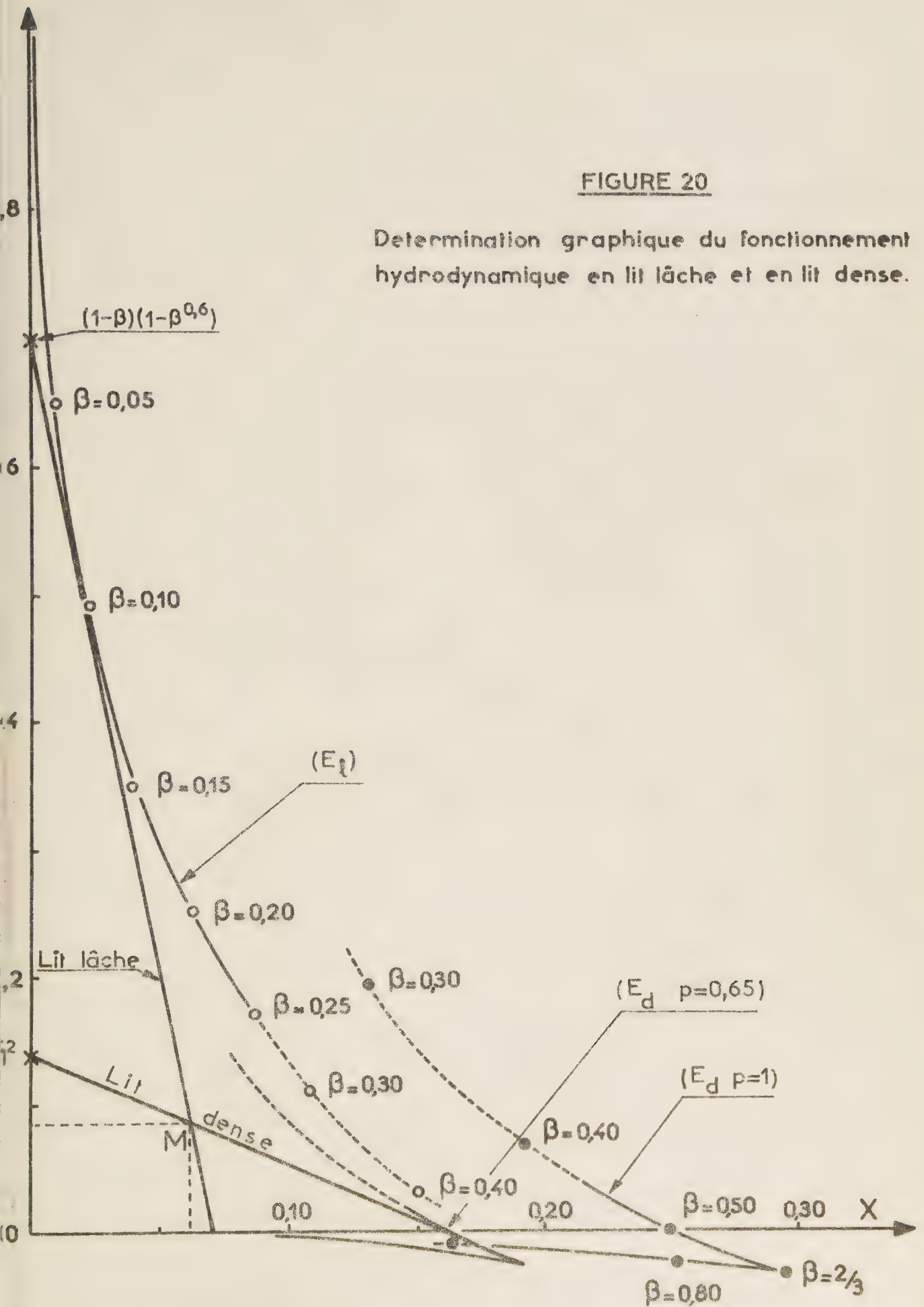
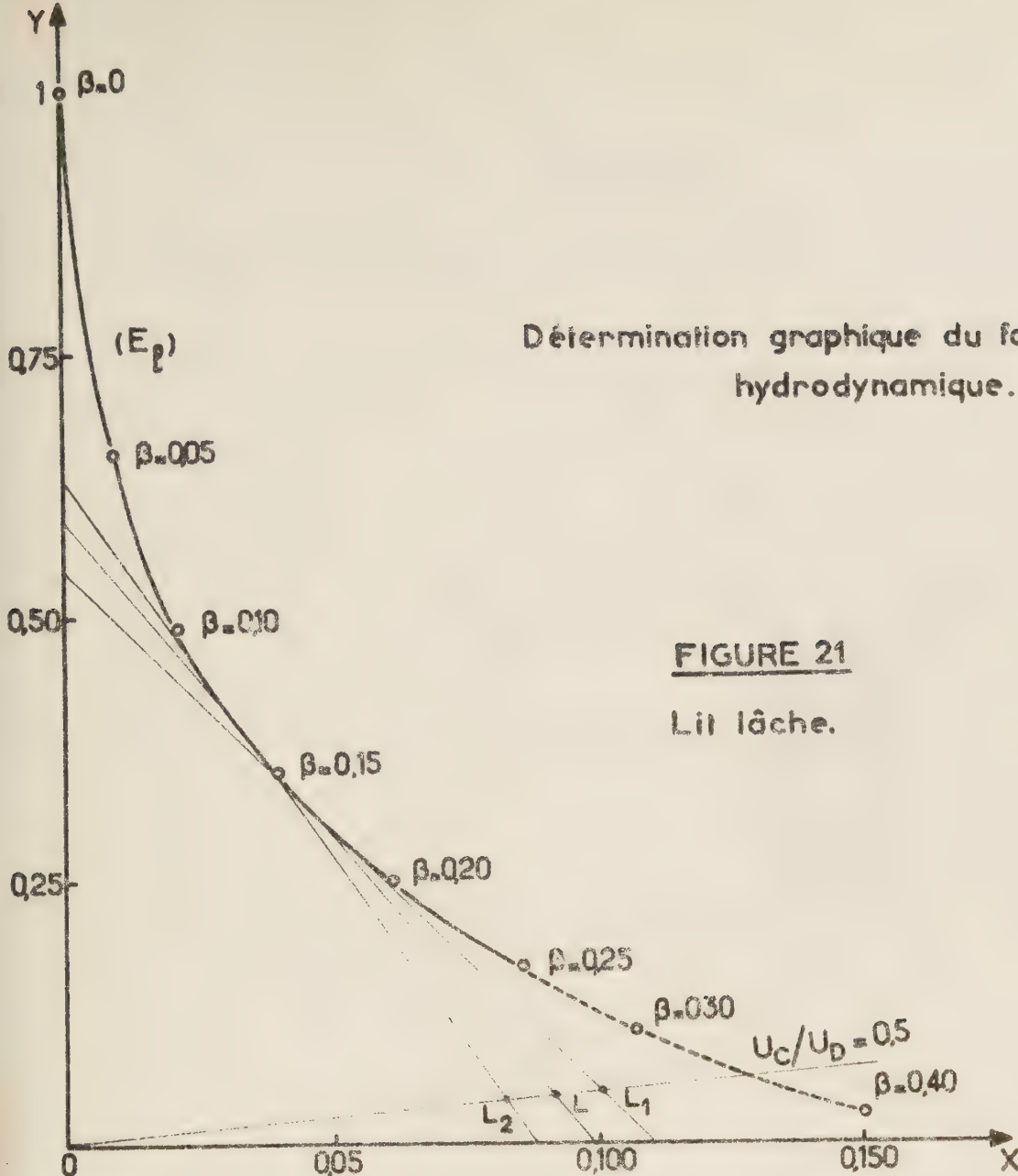


FIGURE 20

Determination graphique du fonctionnement hydrodynamique en lit lâche et en lit dense.





Détermination graphique du fonctionnement hydrodynamique.

FIGURE 21

Lit lâche.

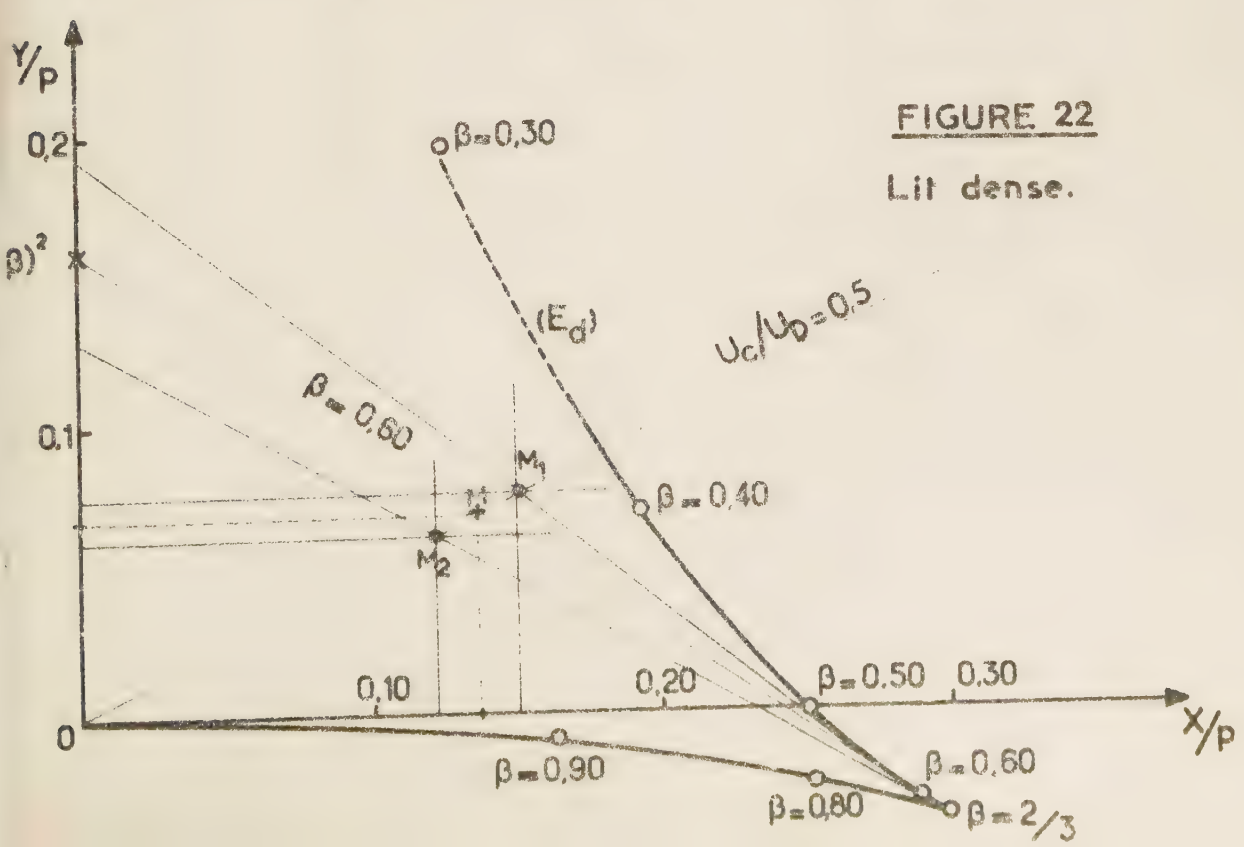


FIGURE 22

Lit dense.

FIGURE 23

Schéma de fonctionnement d'une colonne à pulvérisation.

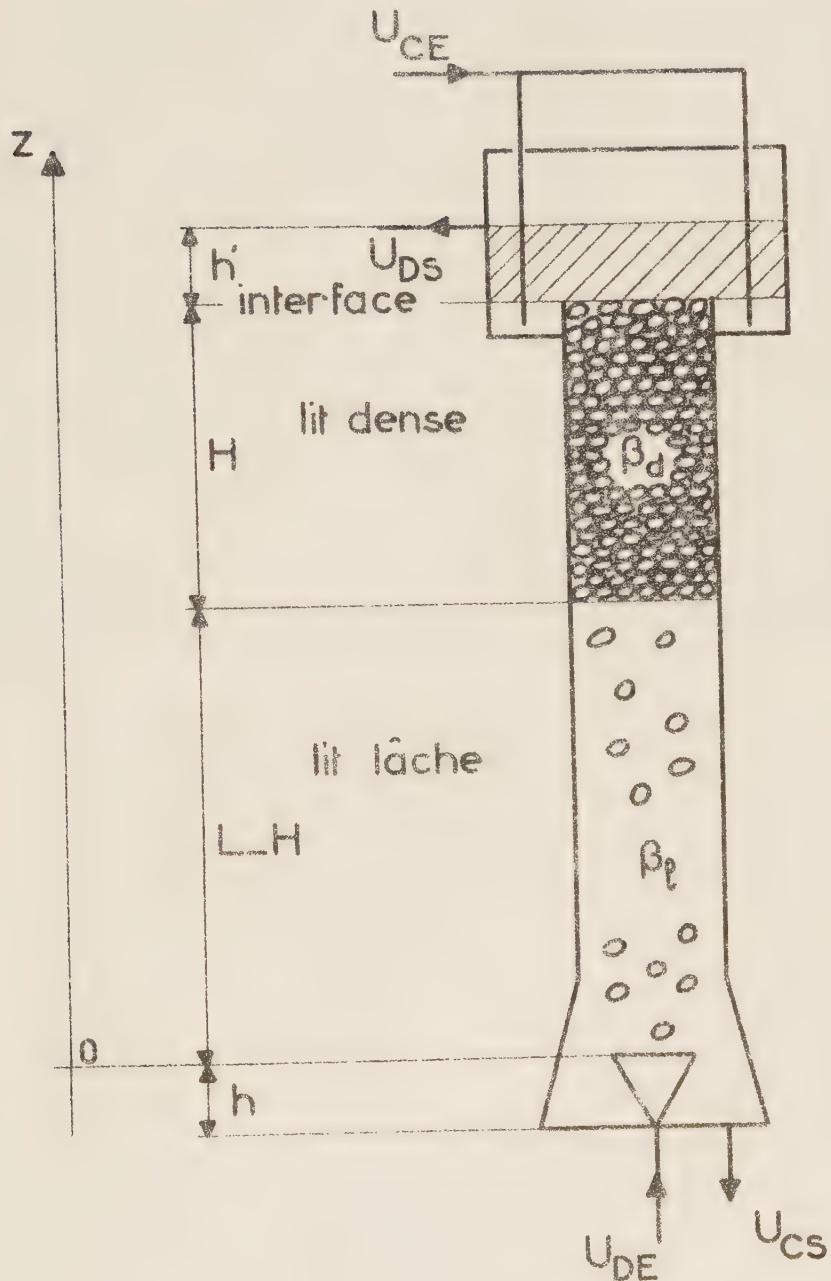


FIGURE 24

Manipulation n°2

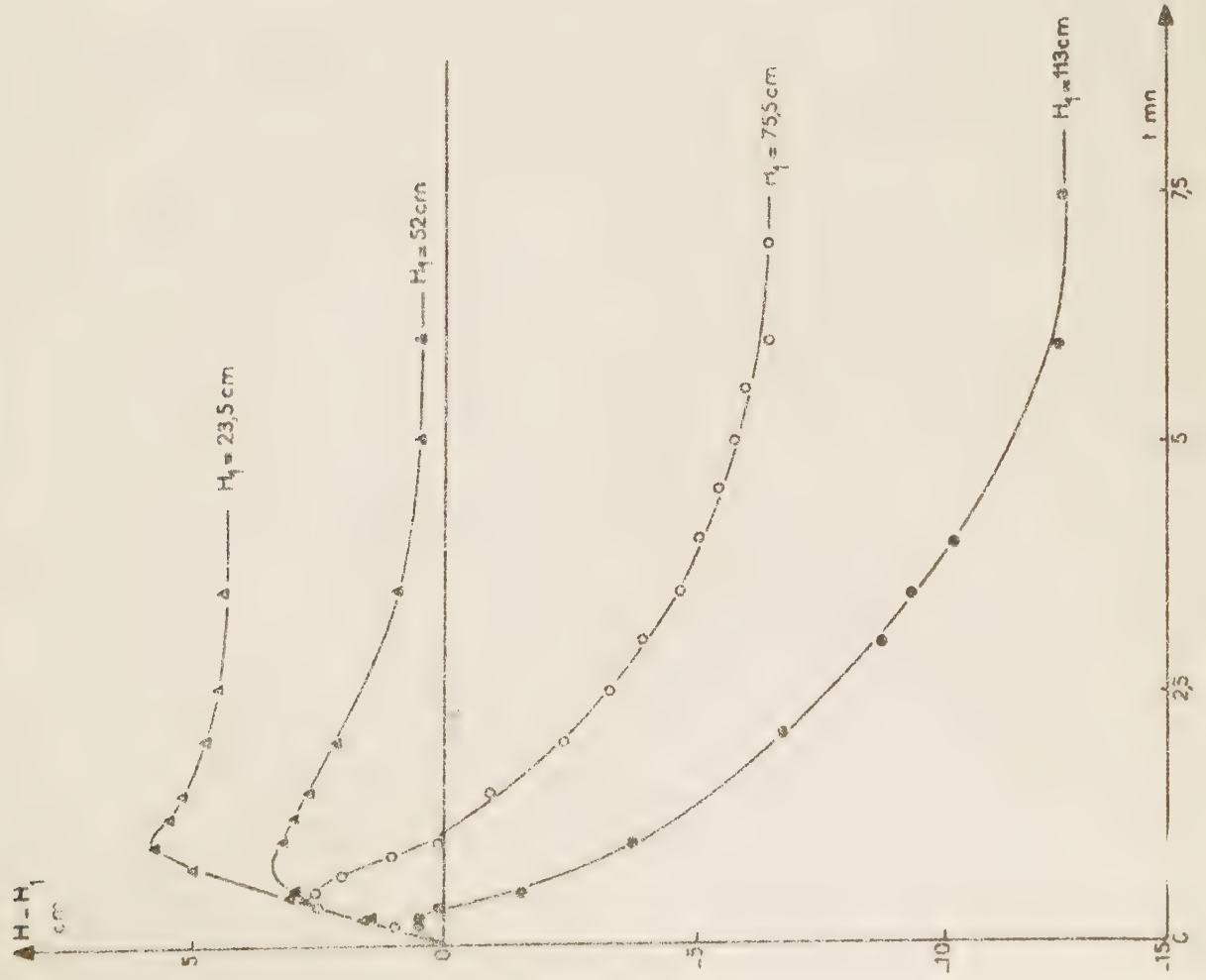


FIGURE 25

Manipulation n°1

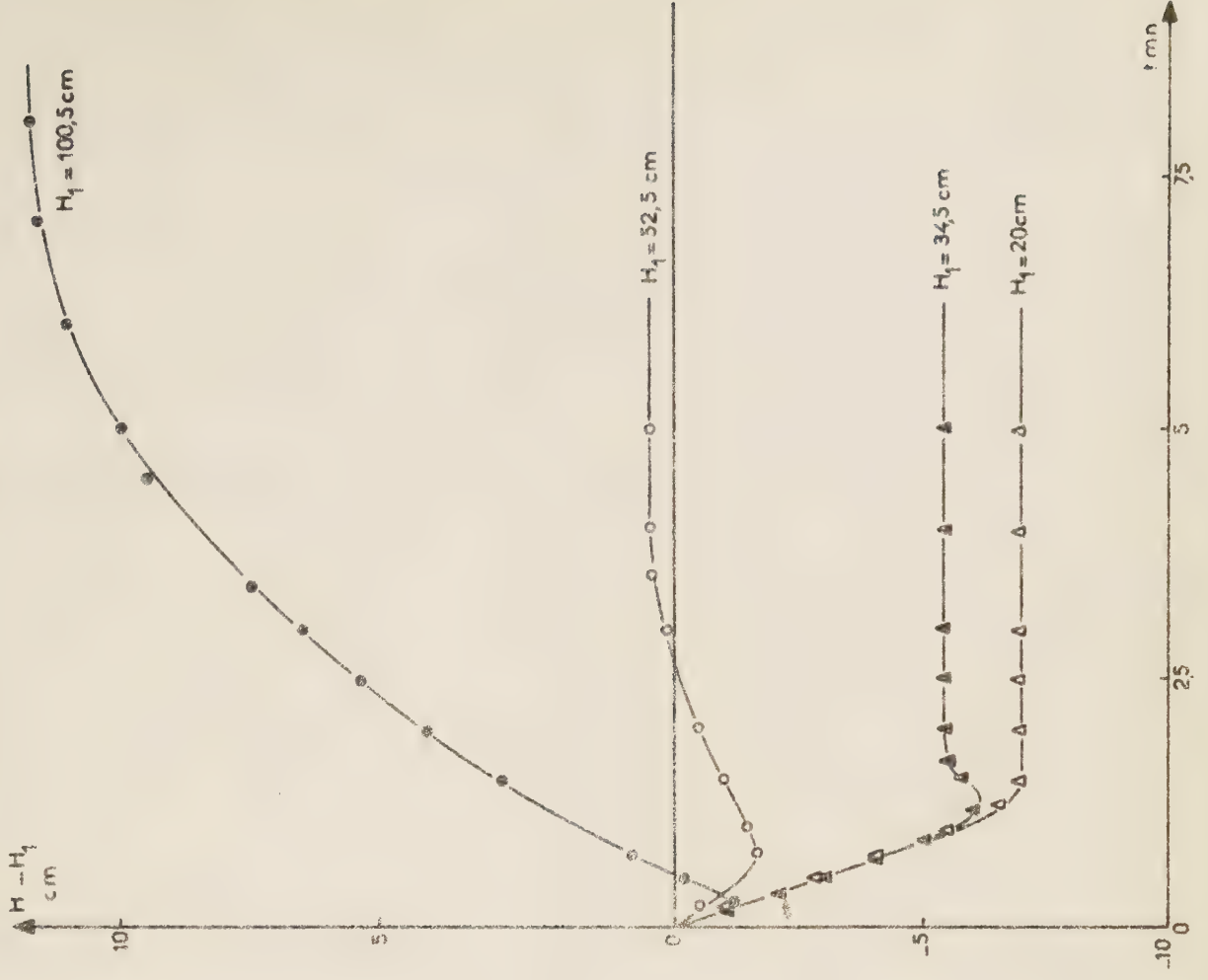


FIGURE 26

Variation de la hauteur du lit dense à la suite d'une variation de U_{CE} Cas n° 4

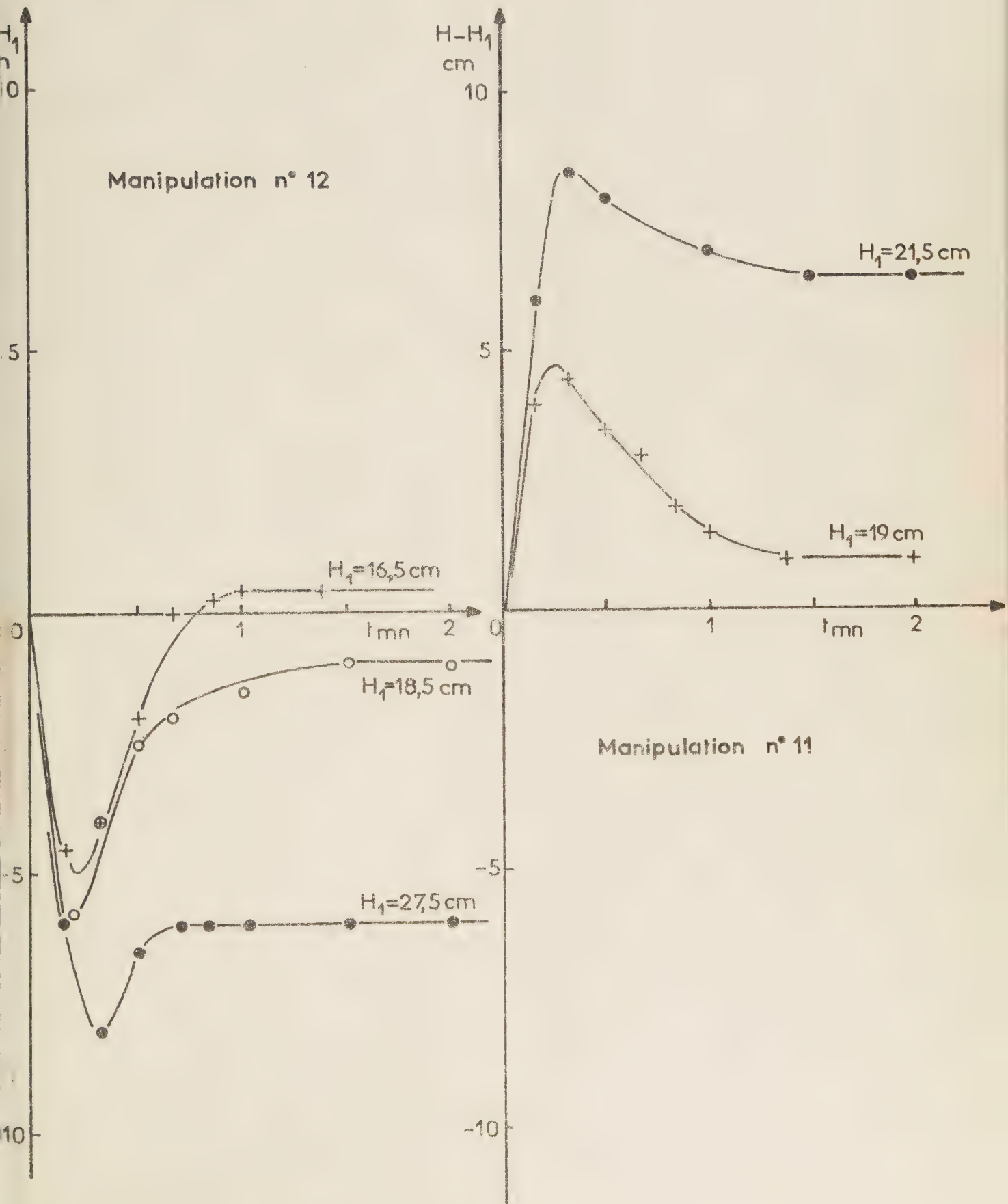


FIGURE 27

Variation totale de la hauteur du lit dense à la suite d'une variation de U_{DE} Cas n°1. Manipulations n°s 5-8.

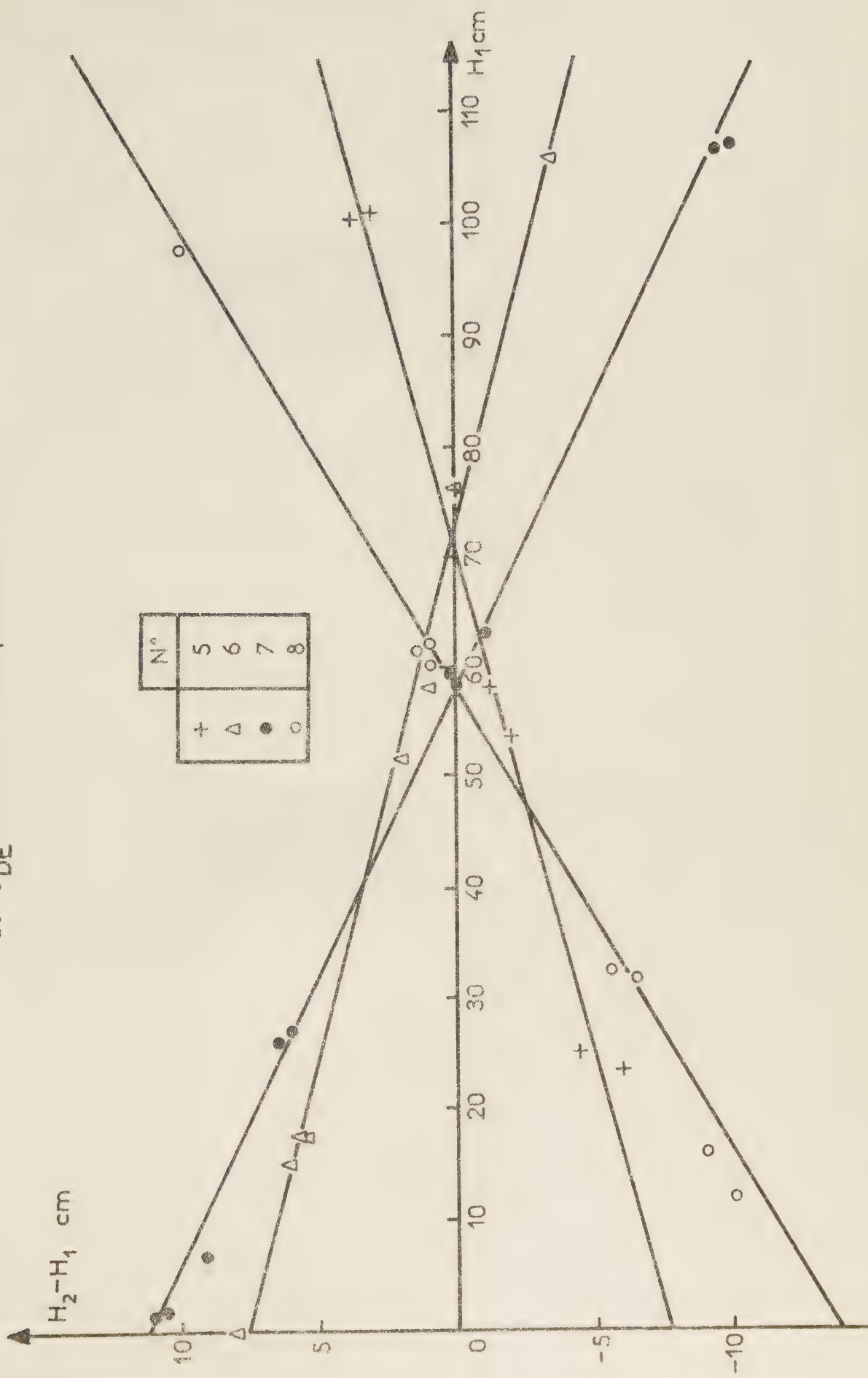


FIGURE 28

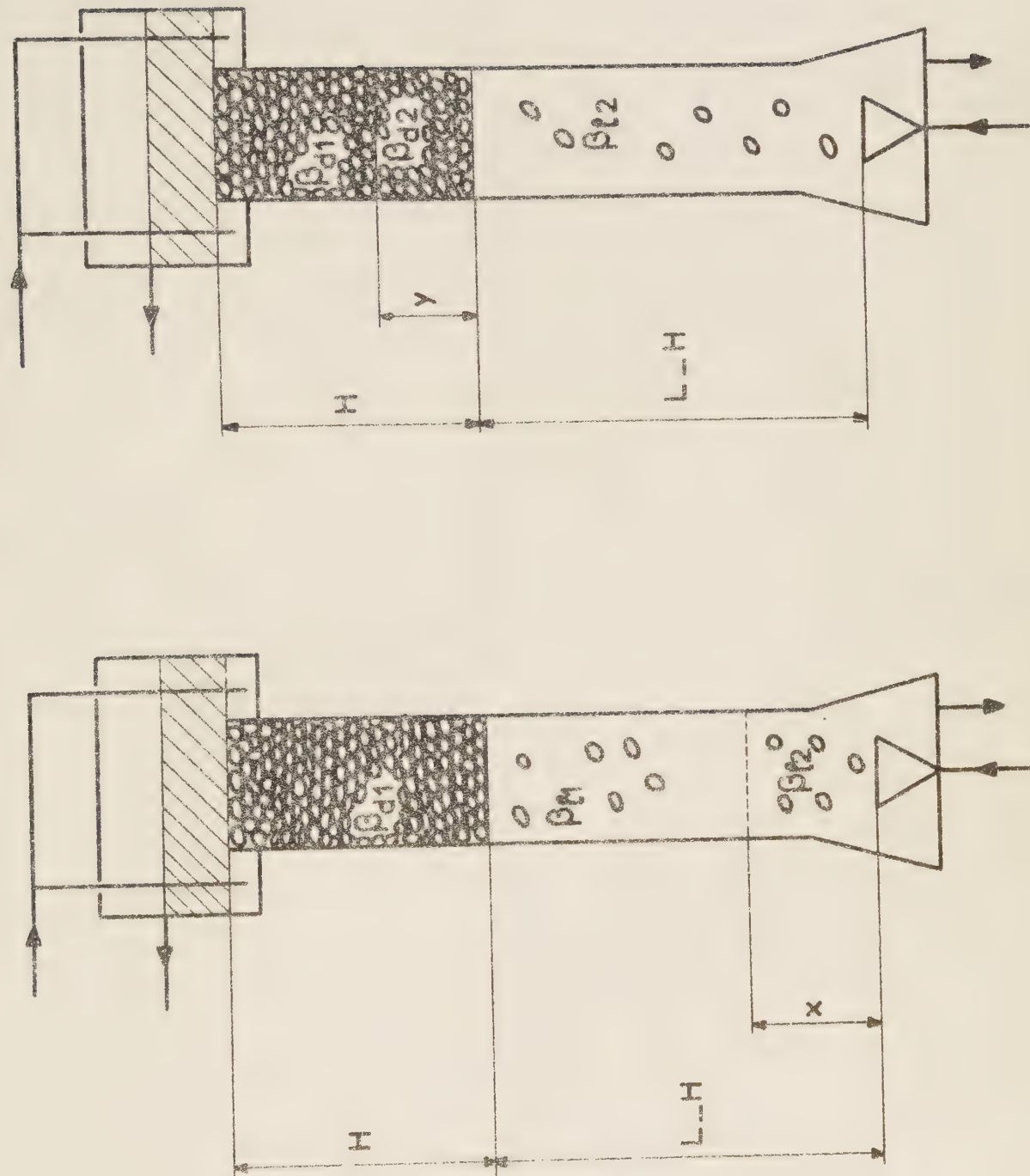


FIGURE 29

Réponse du lit dense à une variation échelon de U_{DE} :
points expérimentaux et courbes calculées.

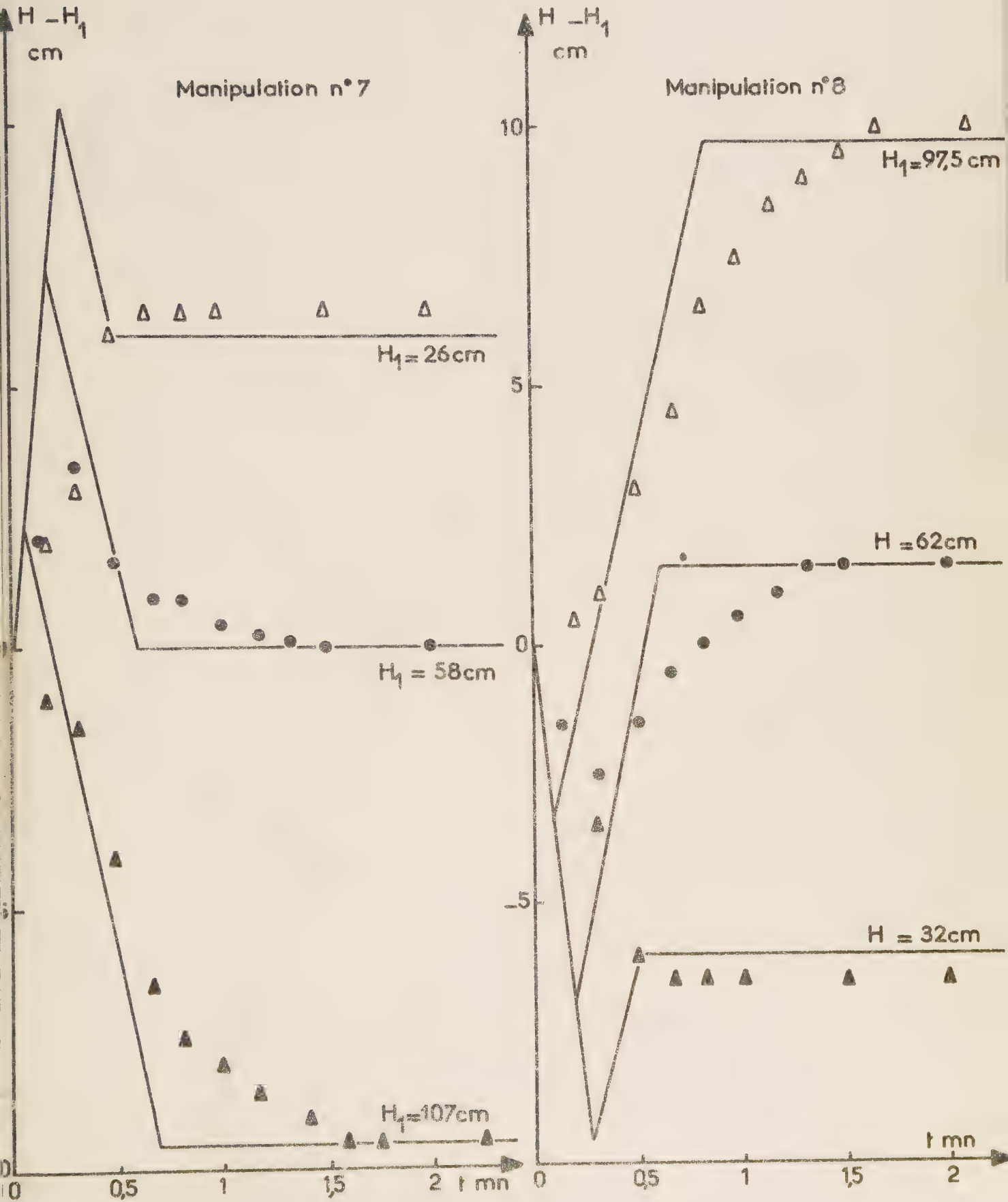


FIGURE 30

Variation de la hauteur du lit dense
à la suite d'une variation du débit
de sortie de phase continue UCS

Cas n°6 Manipulation n°6

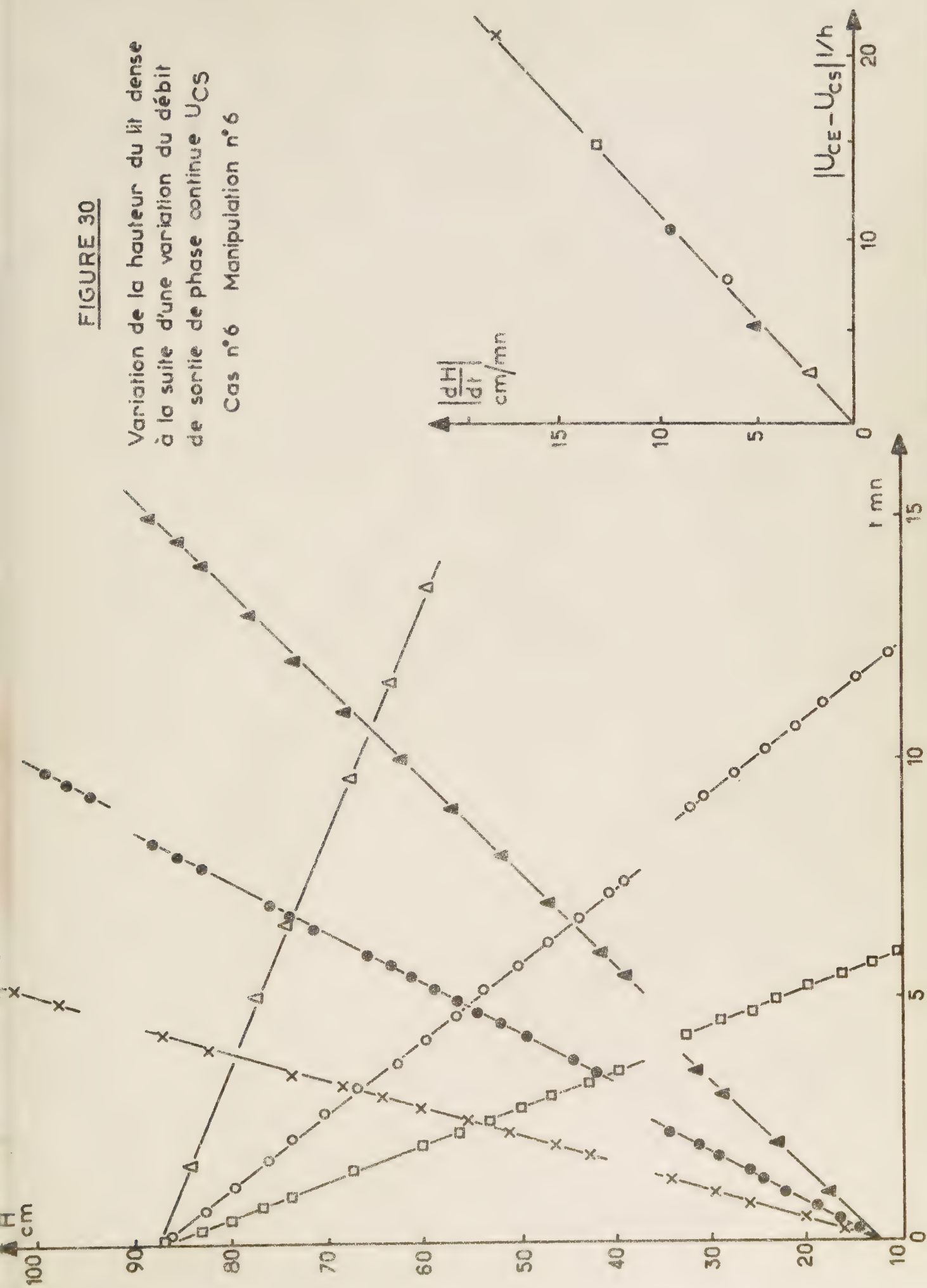


FIGURE 31

Variation de la hauteur du lit dense
à la suite d'une variation du débit U_{DS} .

Cas n°5 Manipulation n°11

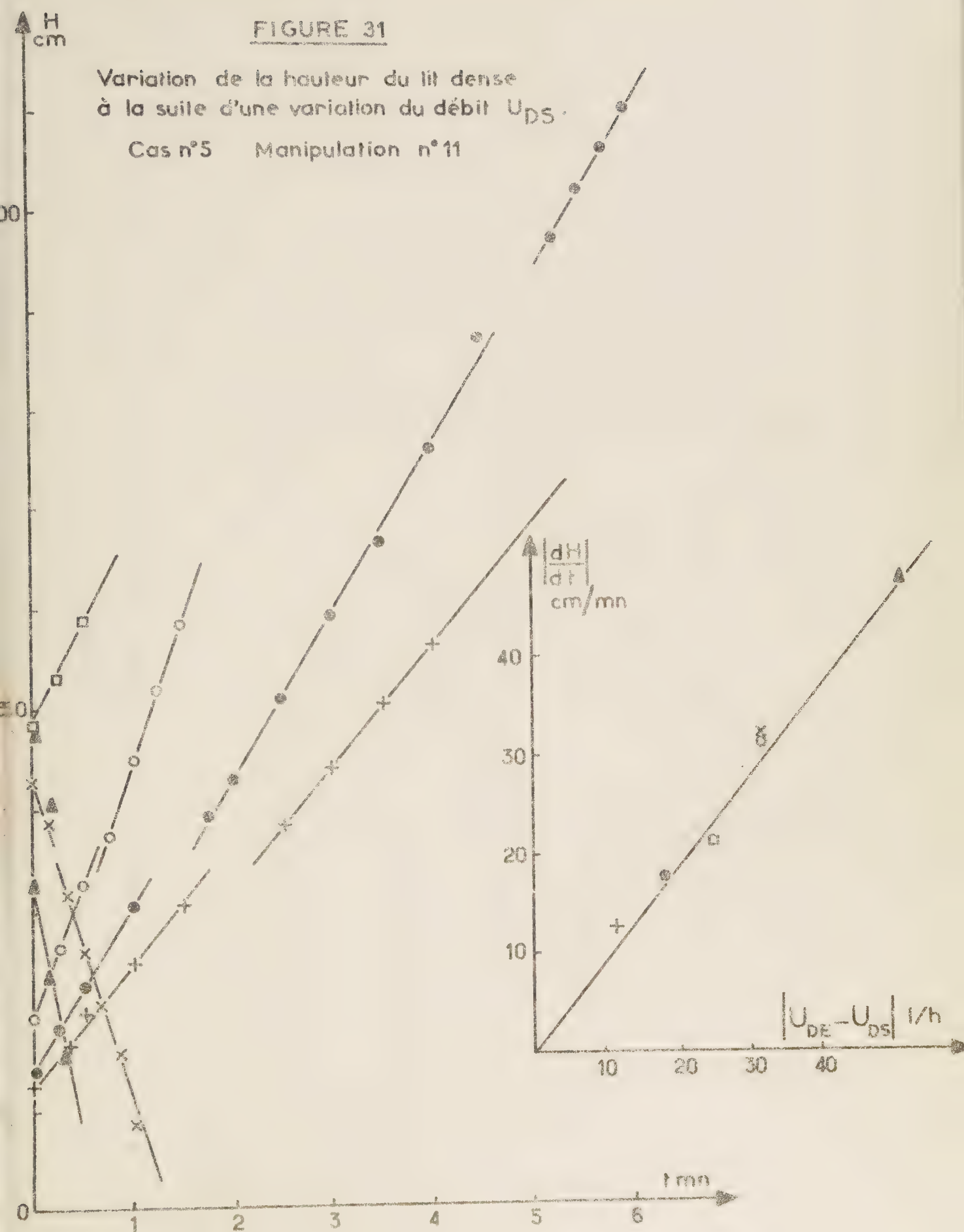
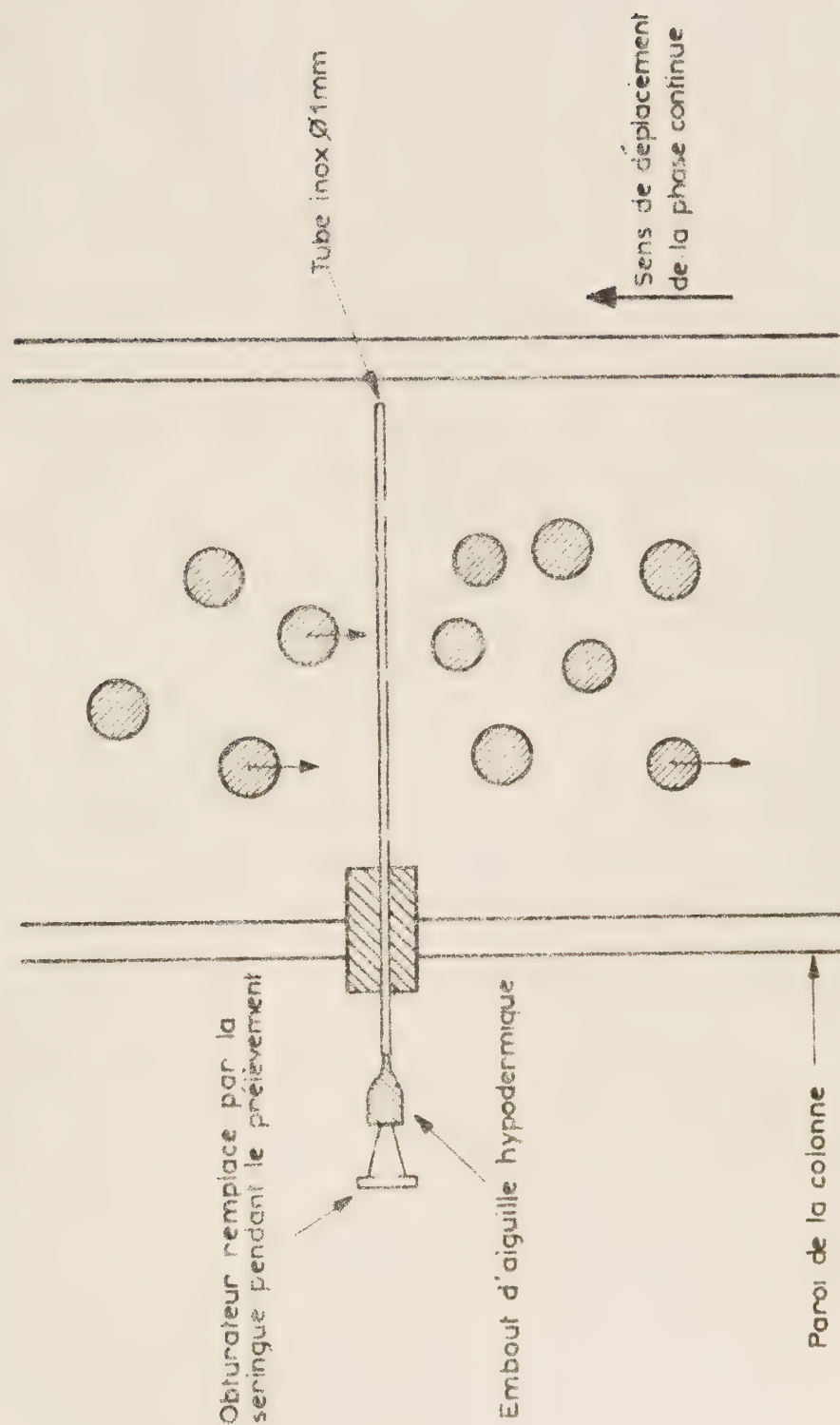


FIGURE 32

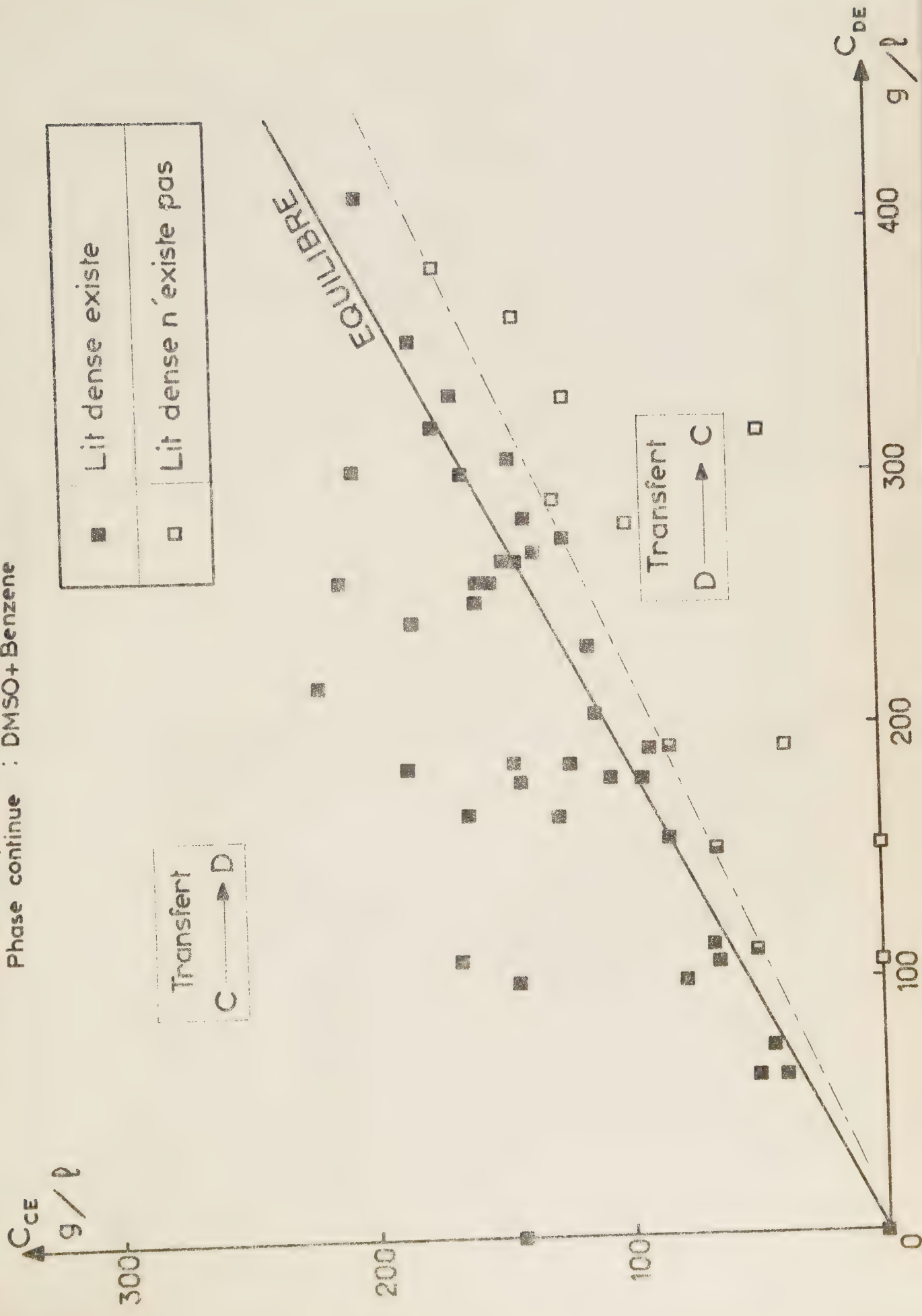
Schéma d'un système de prélèvement.



DOMAINE D'EXISTENCE DU LIT DENSE DANS LA COLONNE A

Phase dispersee : Heptane + Benzène

Phase continue : DMSO + Benzene



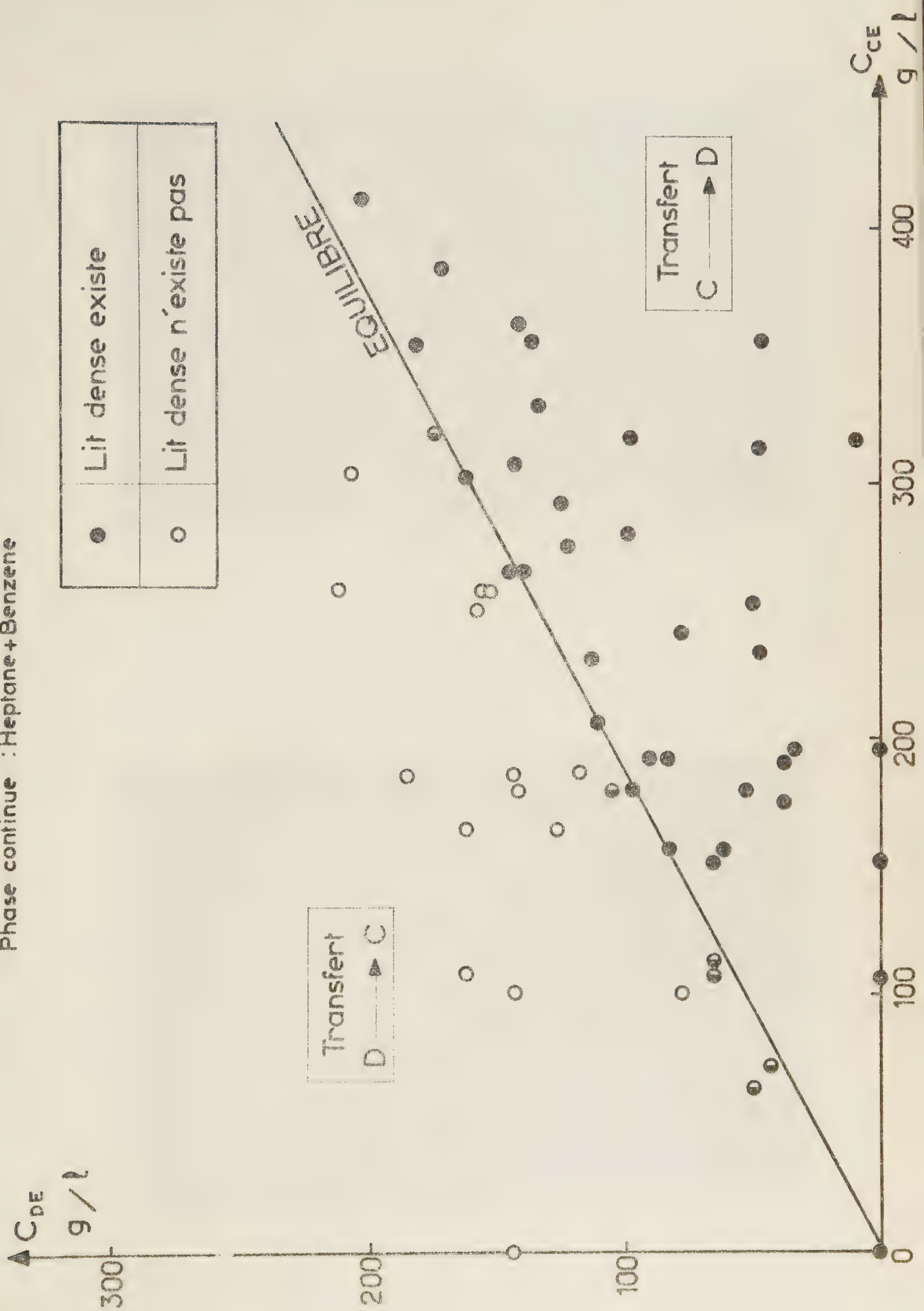
■	Lit dense existe
□	Lit dense n'existe pas

Transfert
C → D

Transfert
D → C

DOMAINE D'EXISTENCE DU LIT DENSE DANS LA COLONNE B

Phase dispersée : DMSO + Benzène
Phase continue : Heptane + Benzène

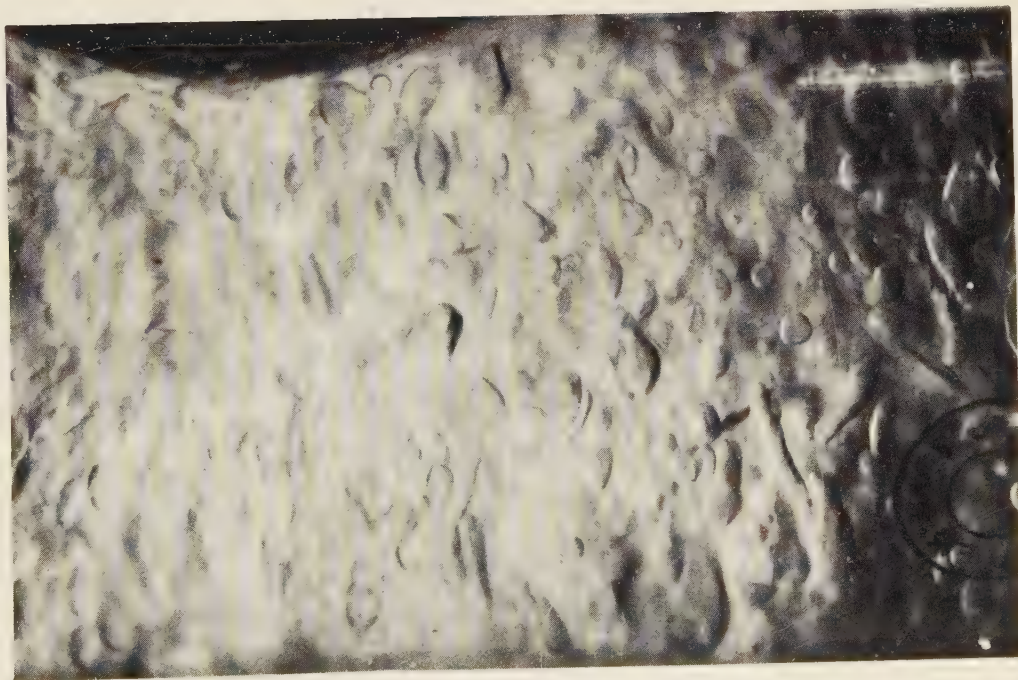


●	Lit dense existe
○	Lit dense n'existe pas

FIGURE 35

TRANSFERT DE MATIERE ET COALESCENCE. SYSTEME HEPTANE-DMSO-BENZENE ↑

TRANSFERT DE MATIERE
D → C

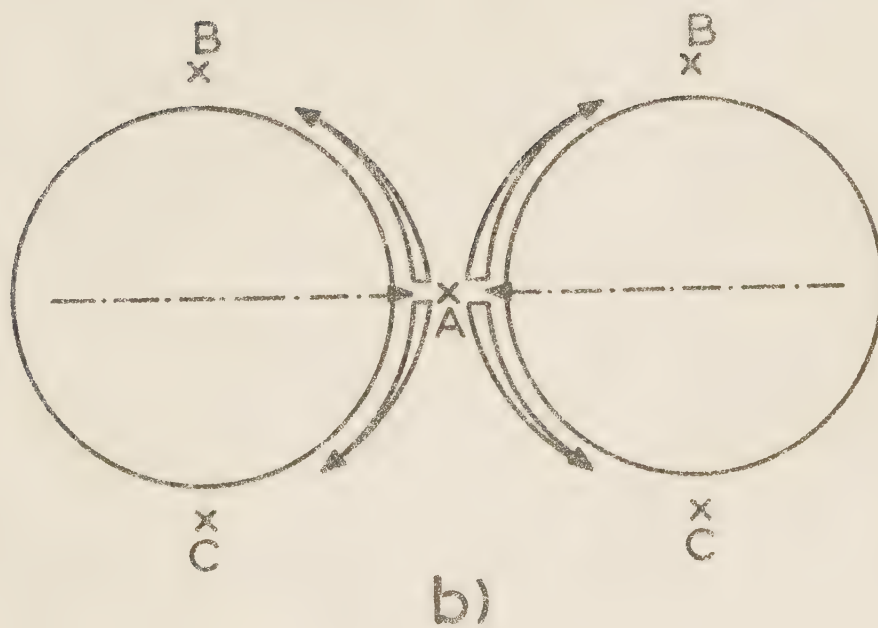
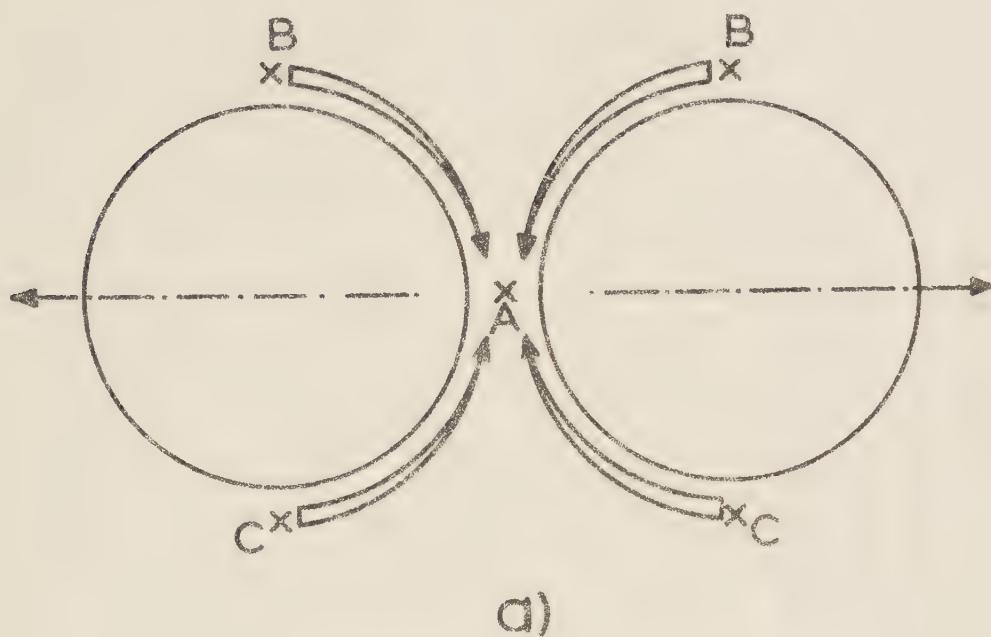


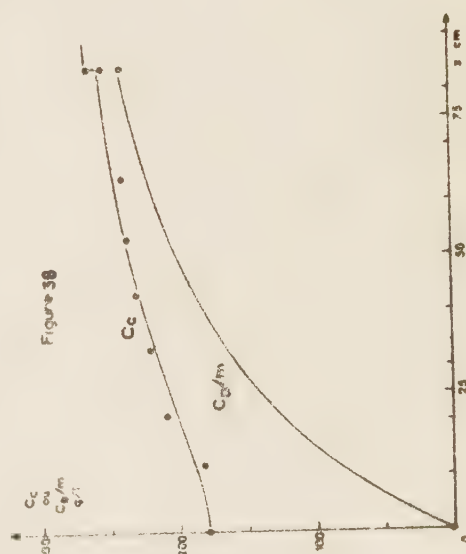
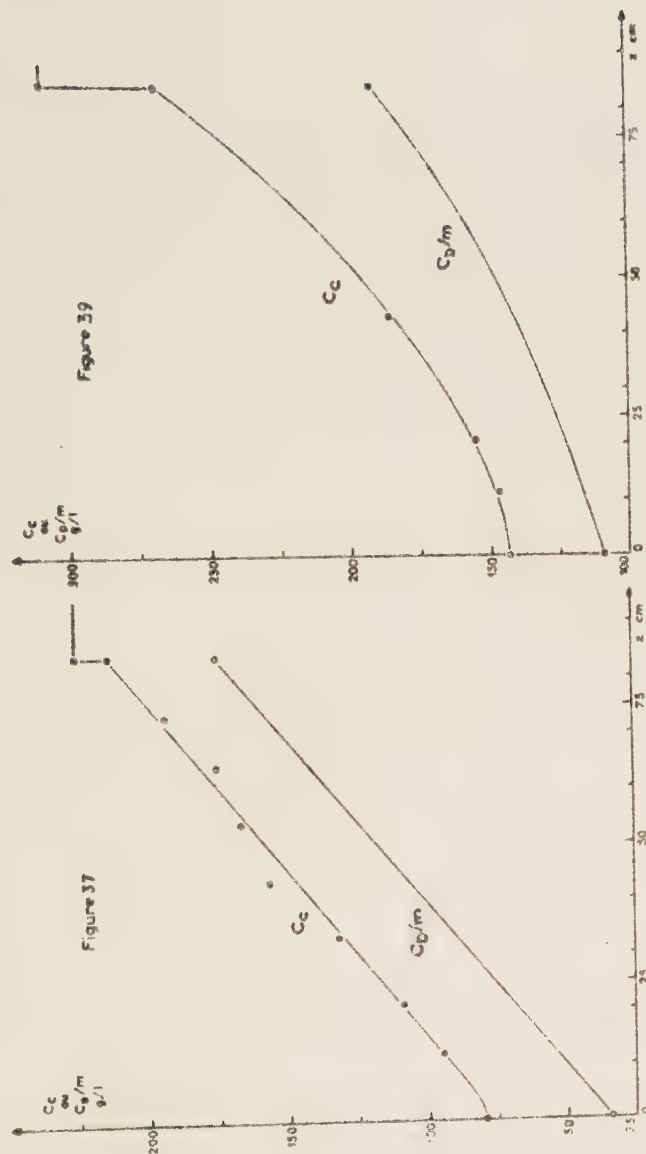
TRANSFERT DE MATIERE
C → D



FIGURE 36

Coalescence en présence de transfert de matière.





Profils de concentrations

Figure 37: Heptane - Eau Acétone $r=1$

Figure 38: Heptane - Eau Acétone $r>1$

Figure 39: Heptane - DMSO - Benzène $r<1$

FIGURE 40

Coefficient de transfert de matière en fonction
de la vitesse relative V_r .

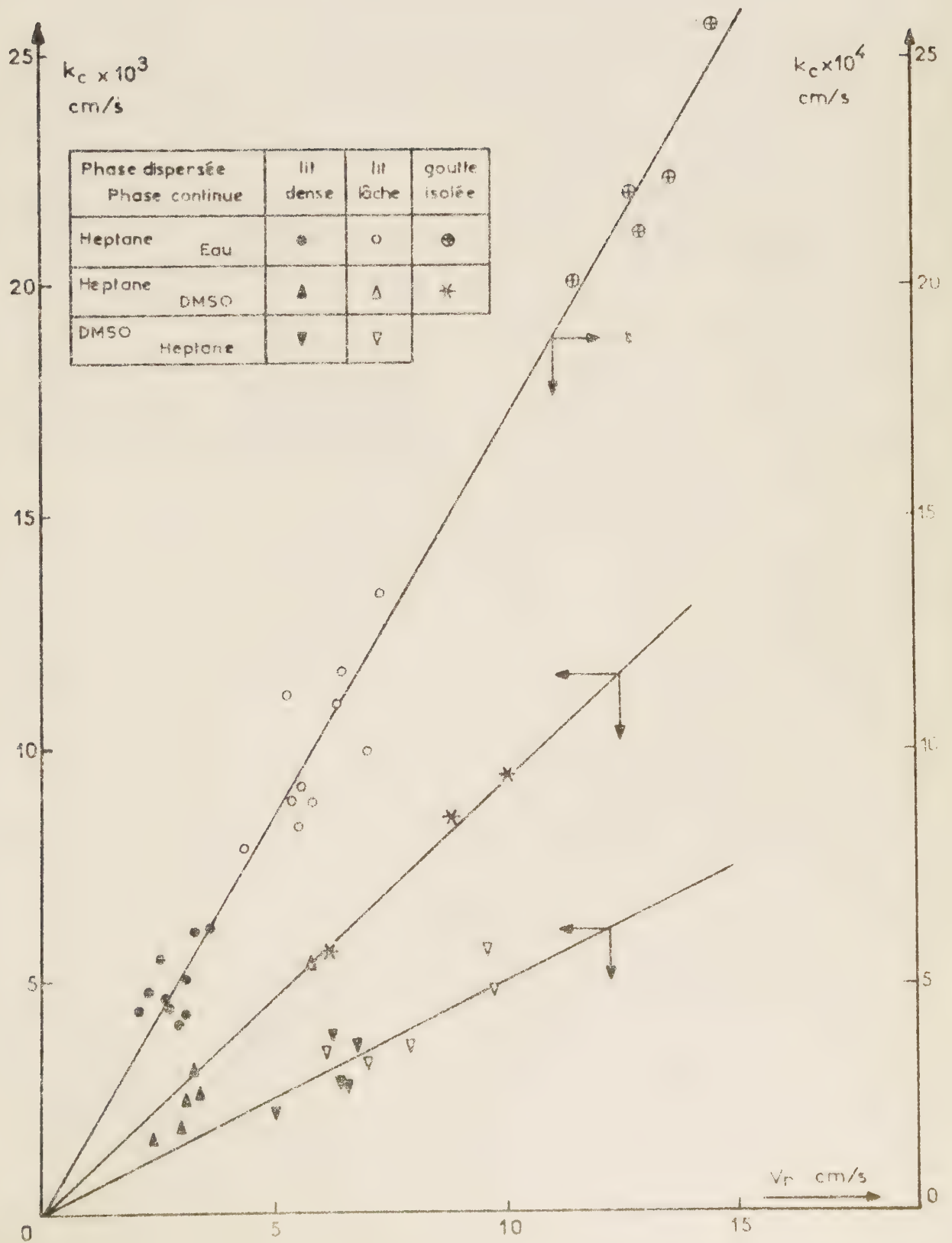
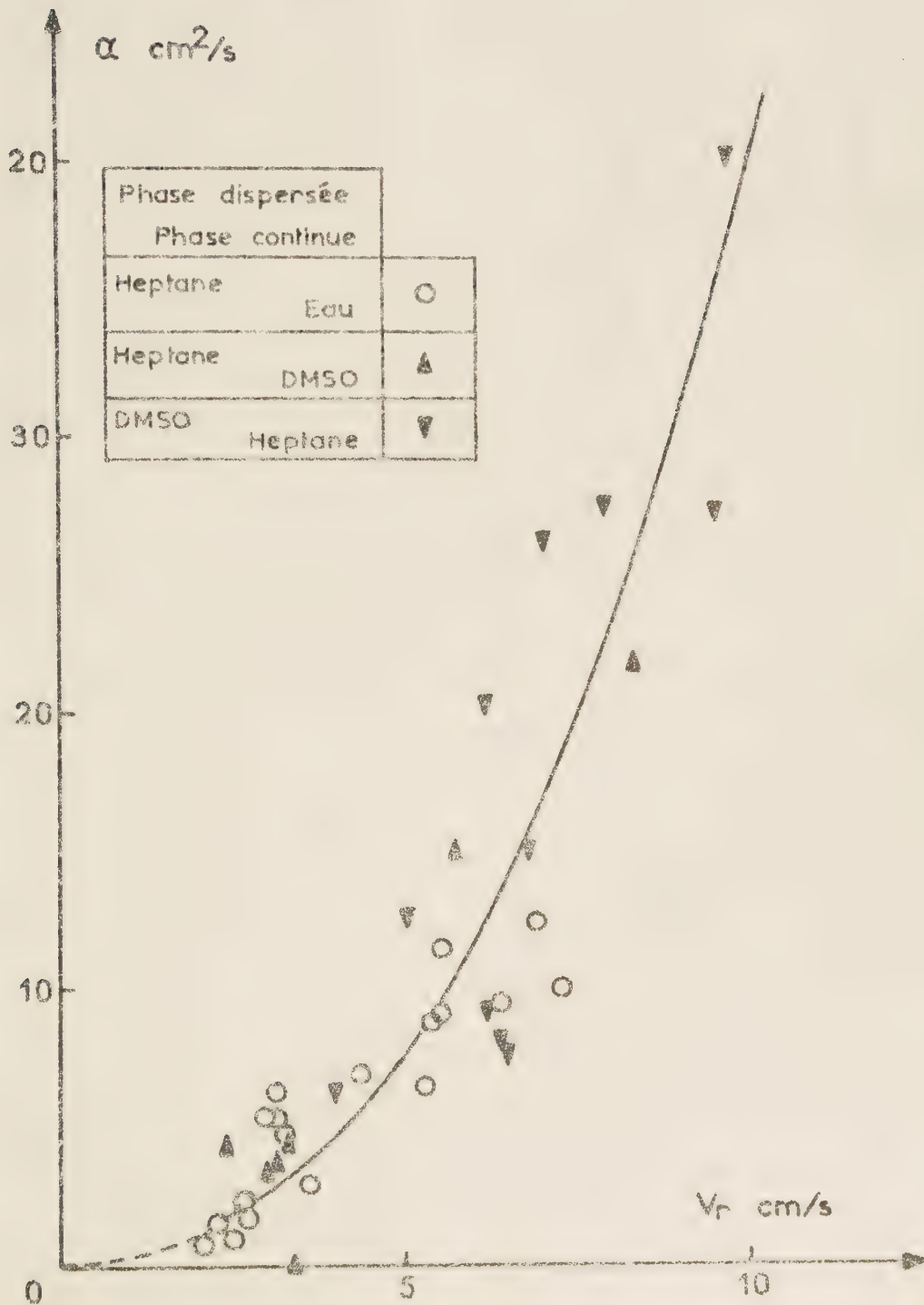


FIGURE 41

Variation du coefficient de dispersion axiale α_c
en fonction de la vitesse relative V_r .



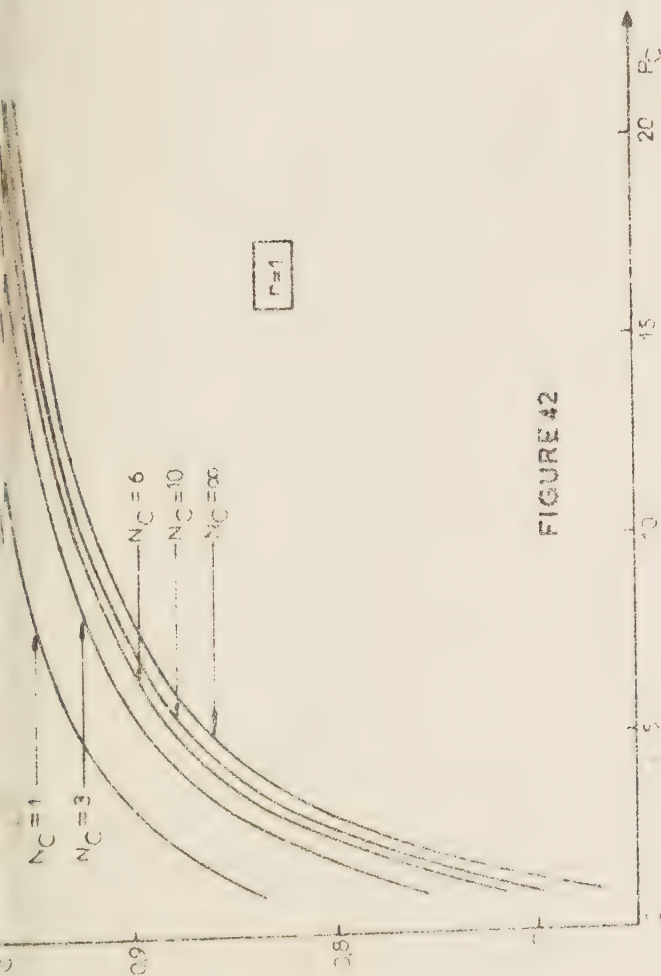


FIGURE 42

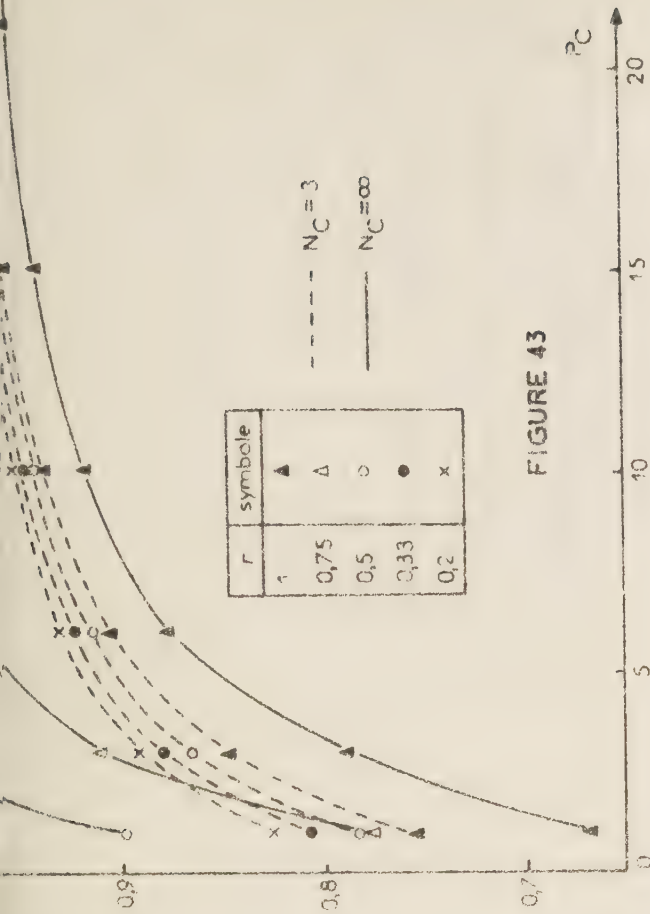


FIGURE 43

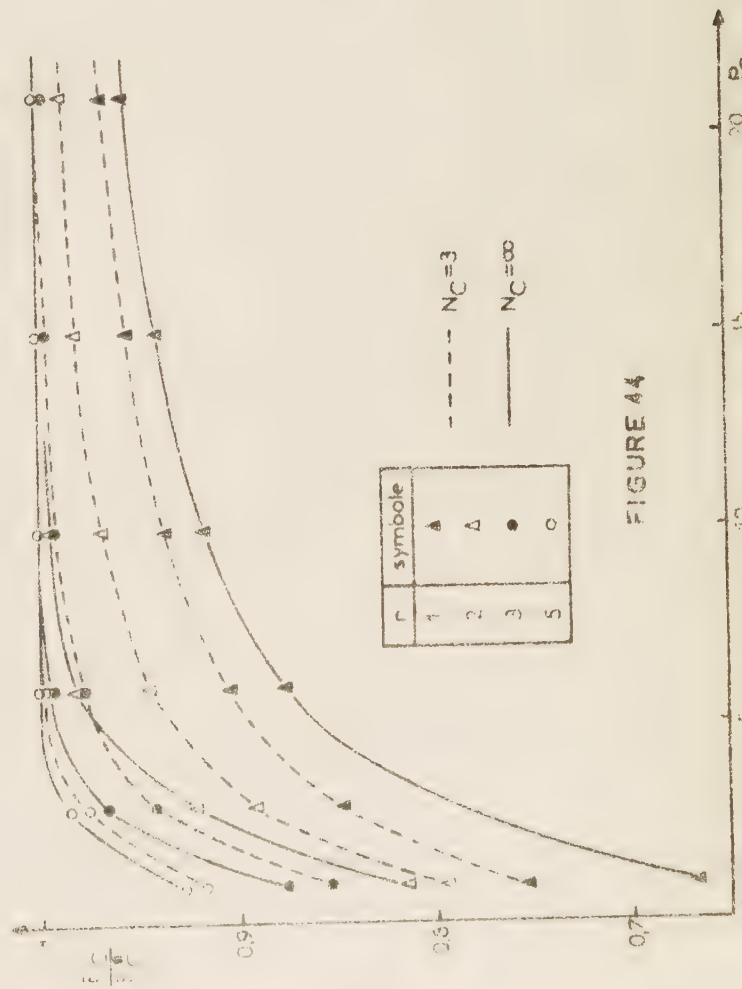


FIGURE 44

Beisse d'efficacité due au mélange axial.

FIGURE 42 $r=1$

FIGURE 43 $r \leq 1$

FIGURE 44 $r \geq 1$

Hauteurs d'un étage théorique en lit lâche et en lit dense.

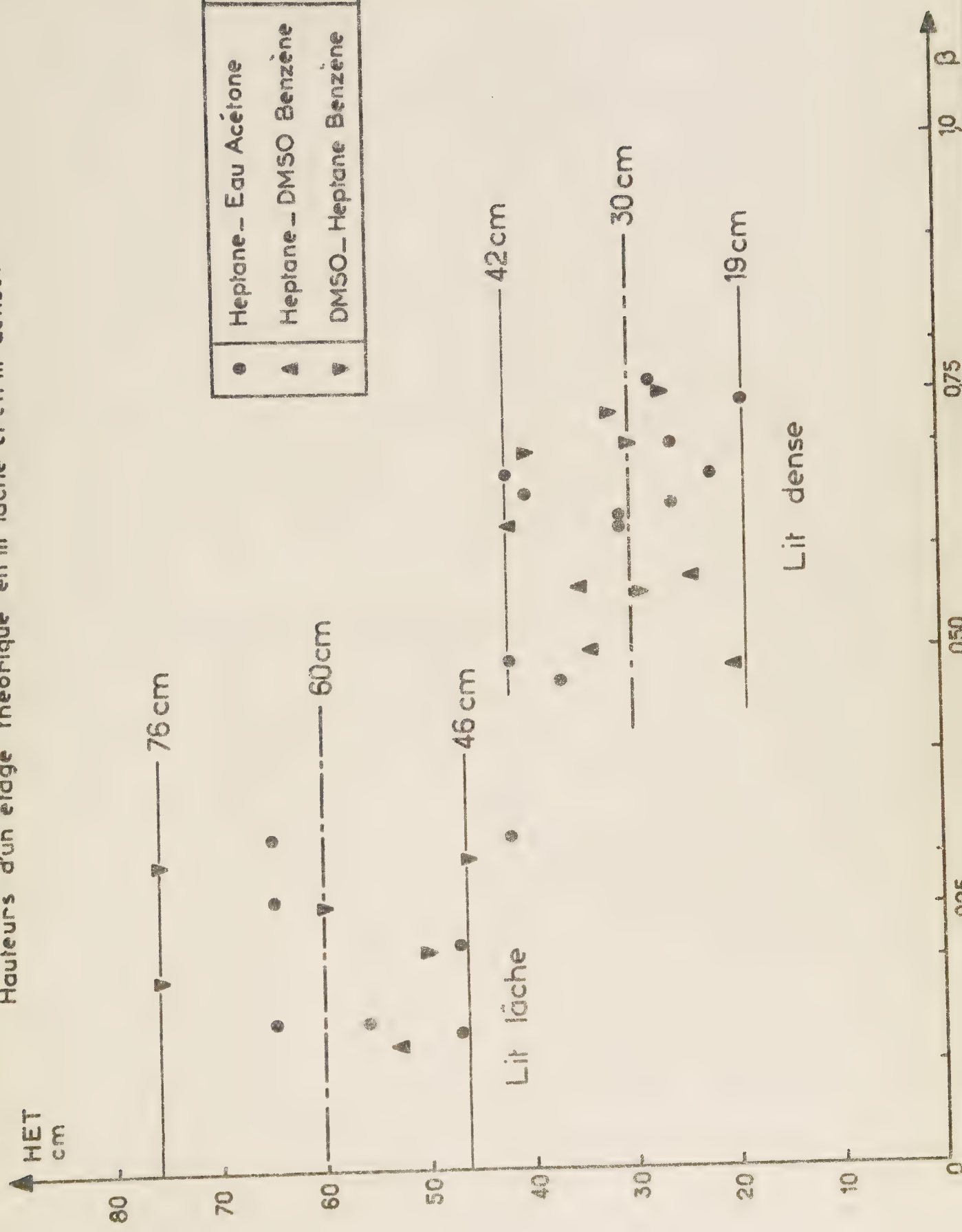


FIGURE 46

Schéma général de l'appareil.

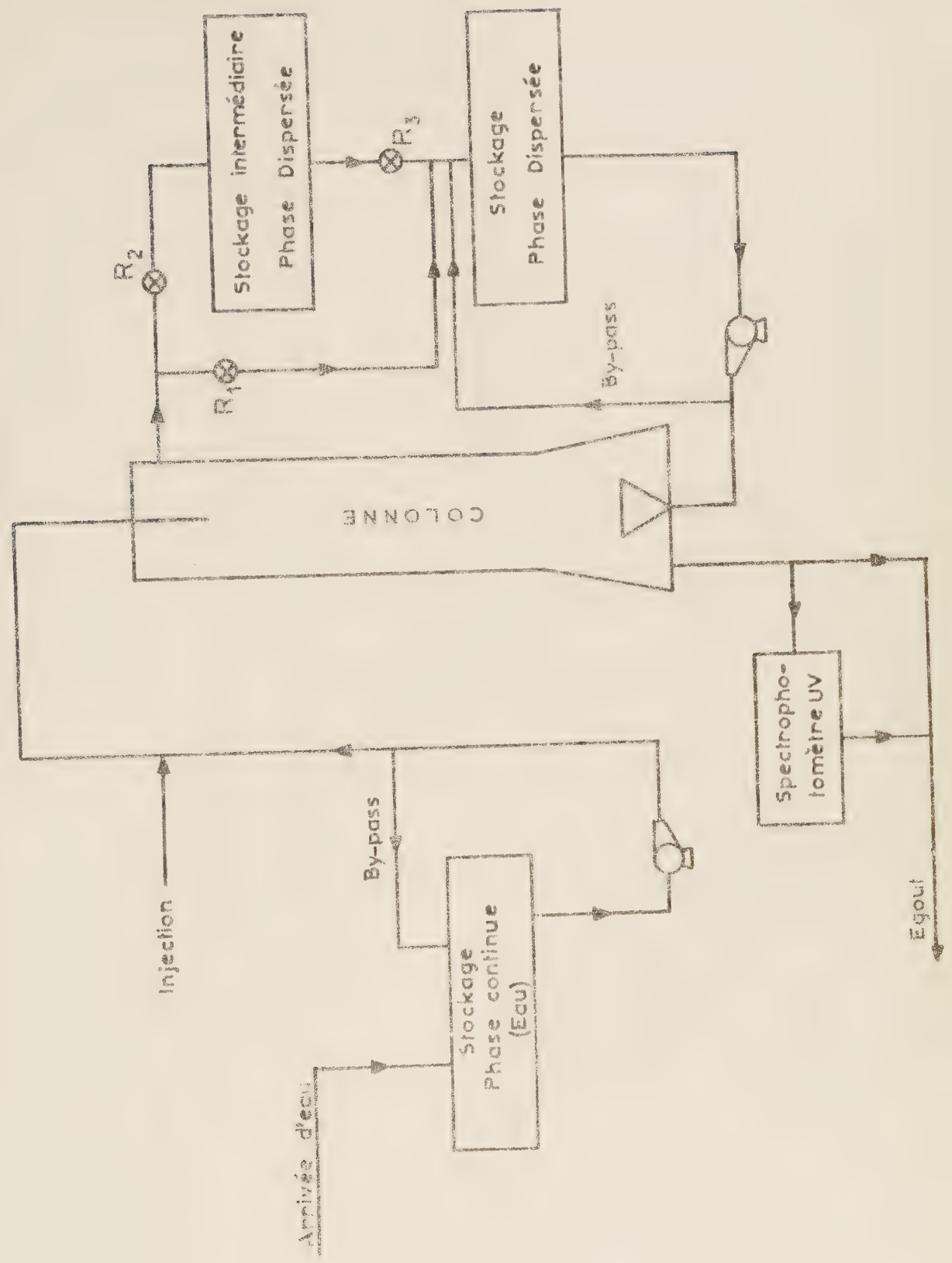


FIGURE 47

Schéma de la boucle d'injection de soluté pour les colonnes de 15 et 30 cm de diamètre.

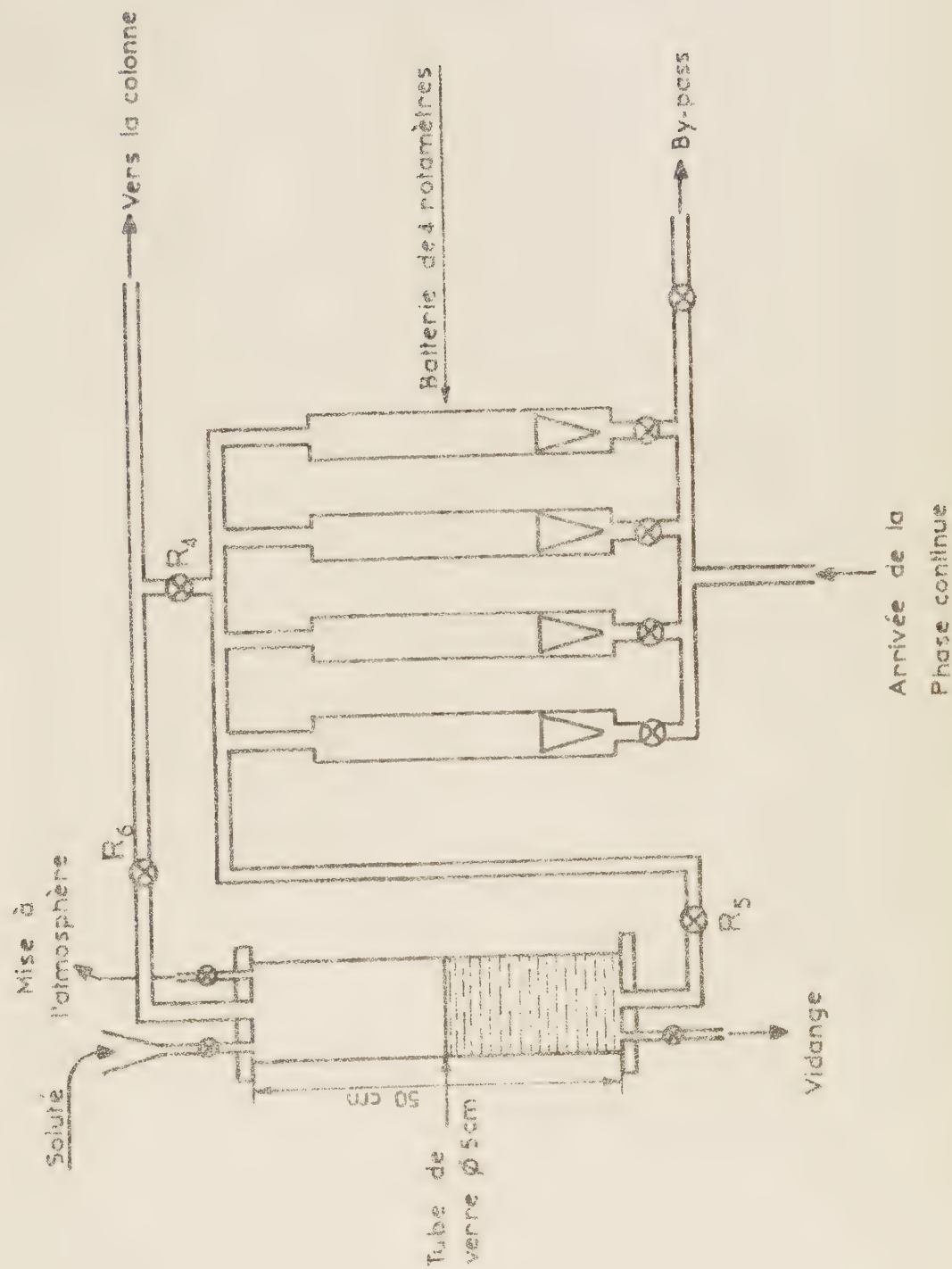


FIGURE 48

Courbe d'étalonnage du spectrophotomètre UV

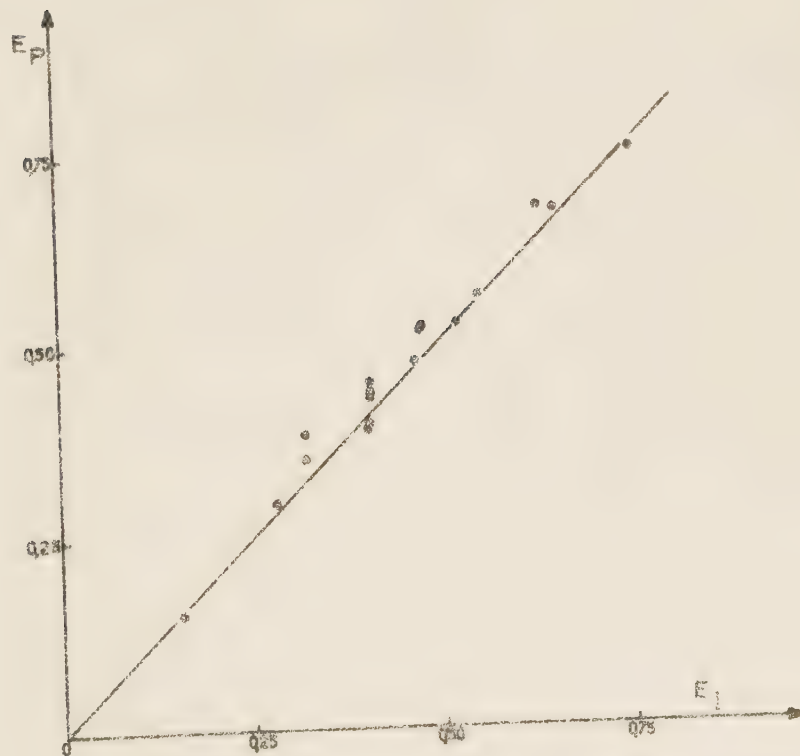
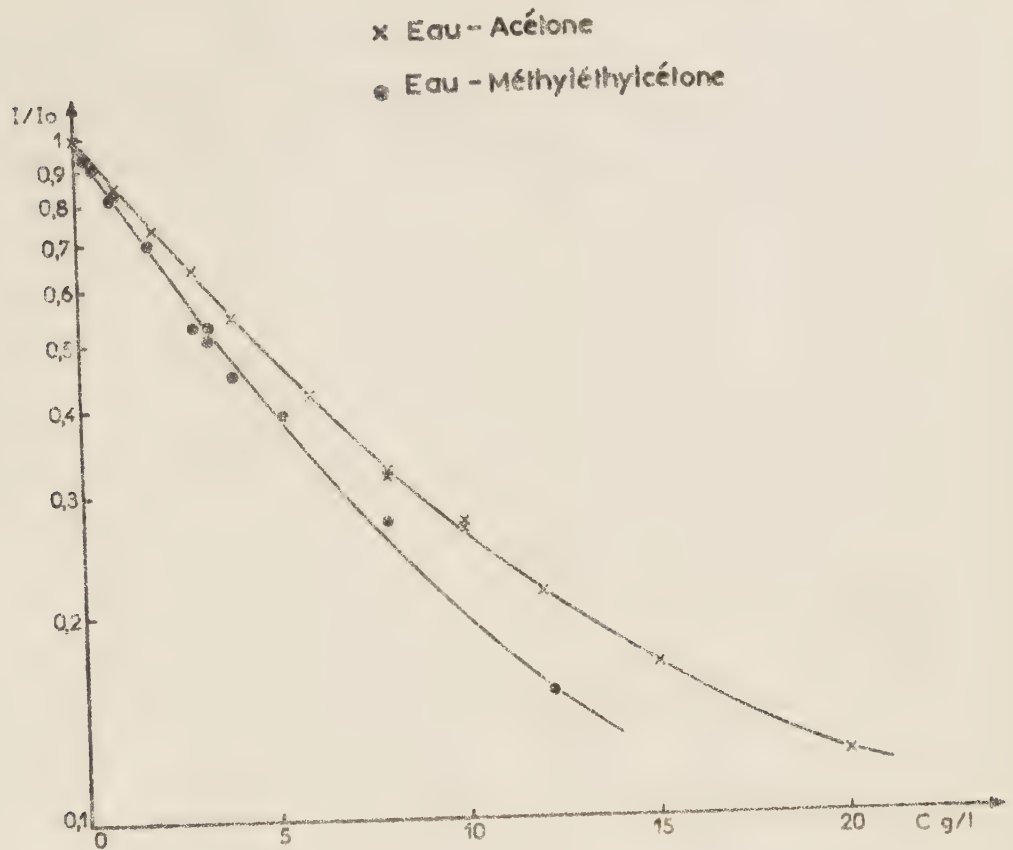


FIGURE 49

Comparaison de l'efficacité mesurée par la méthode
impulsionnelle et de l'efficacité mesurée en régime permanent

Colonne A ↑ Heptane - Eau Acétone

FIGURE 50

Schéma de la chambre supérieure de la colonne et
du système d'injection de la phase continue.

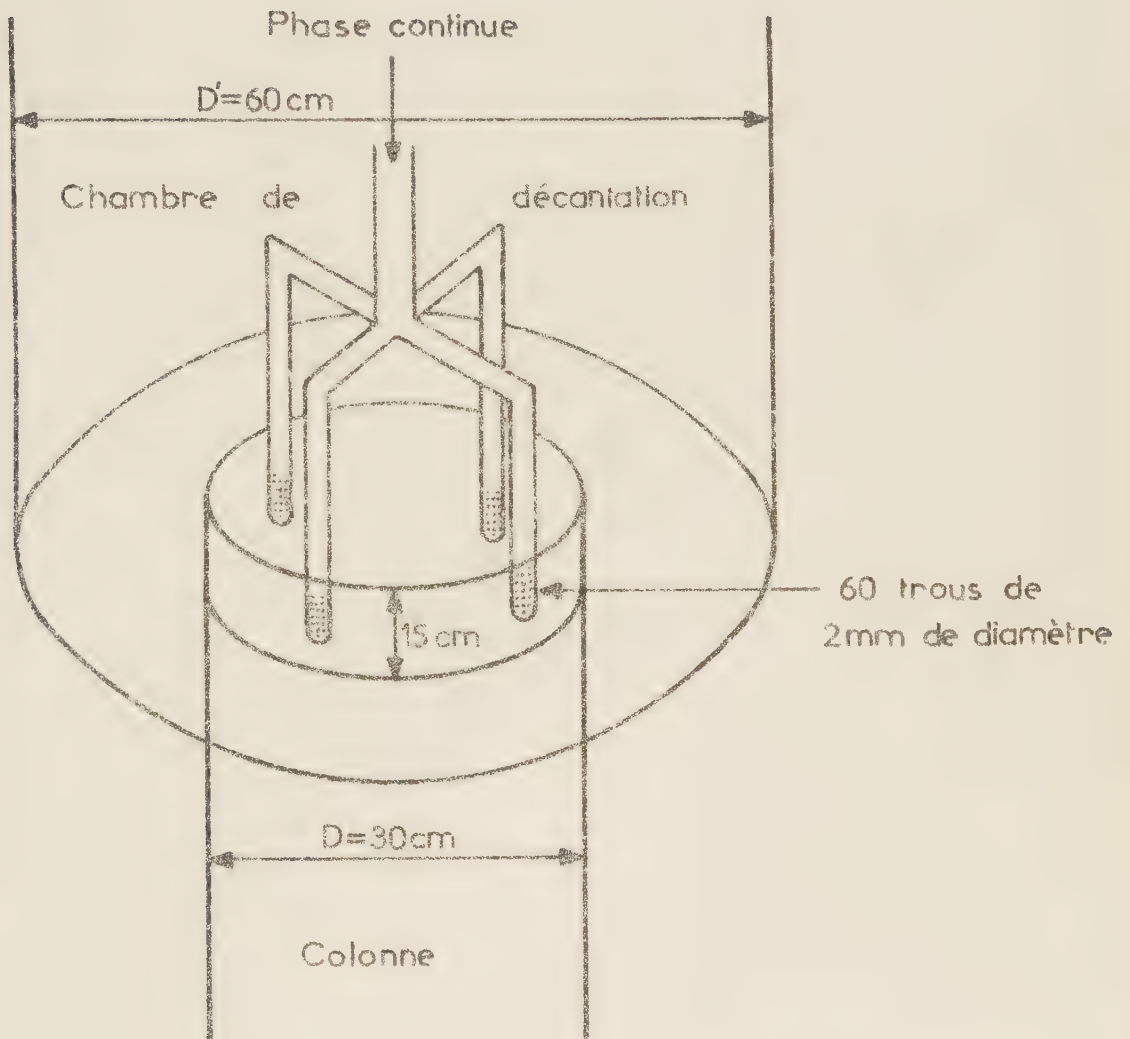


FIGURE 51

Variation de la hauteur d'étage théorique avec le diamètre de la colonne en lit lâche (Echelles log).

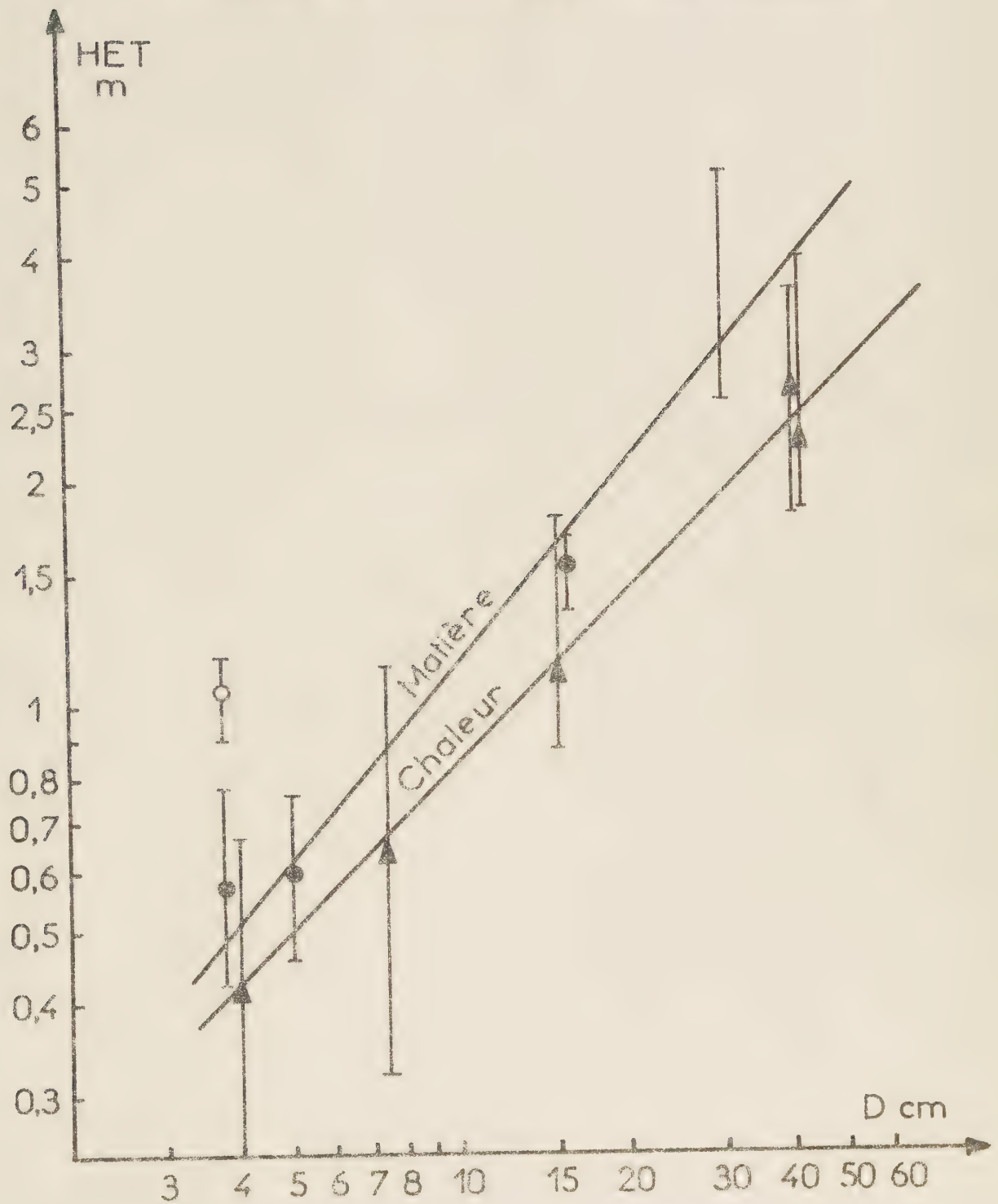


FIGURE 52

Variation de la hauteur d'étage théorique avec le diamètre de la colonne en III dense (Echelles semi-log).

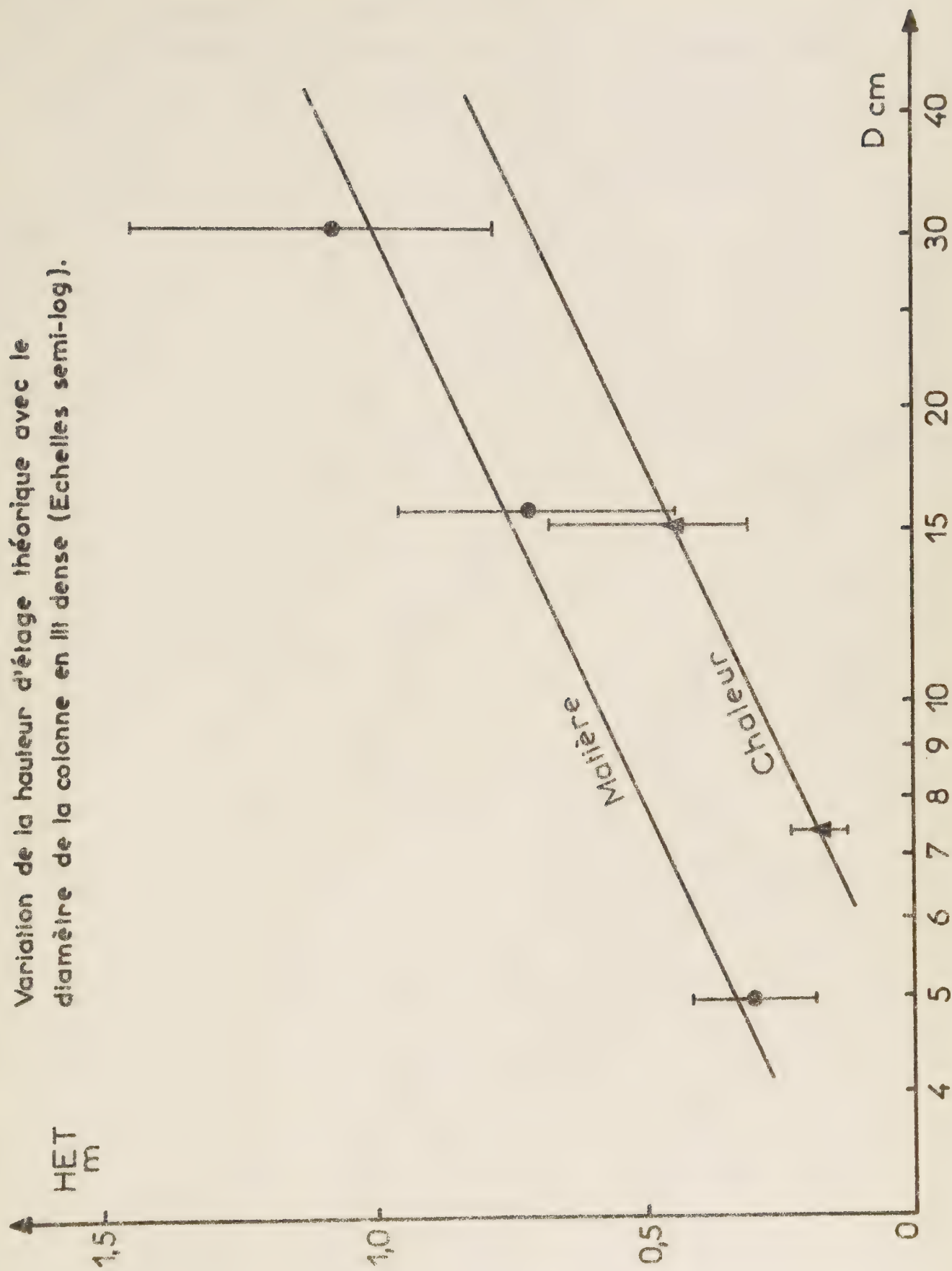
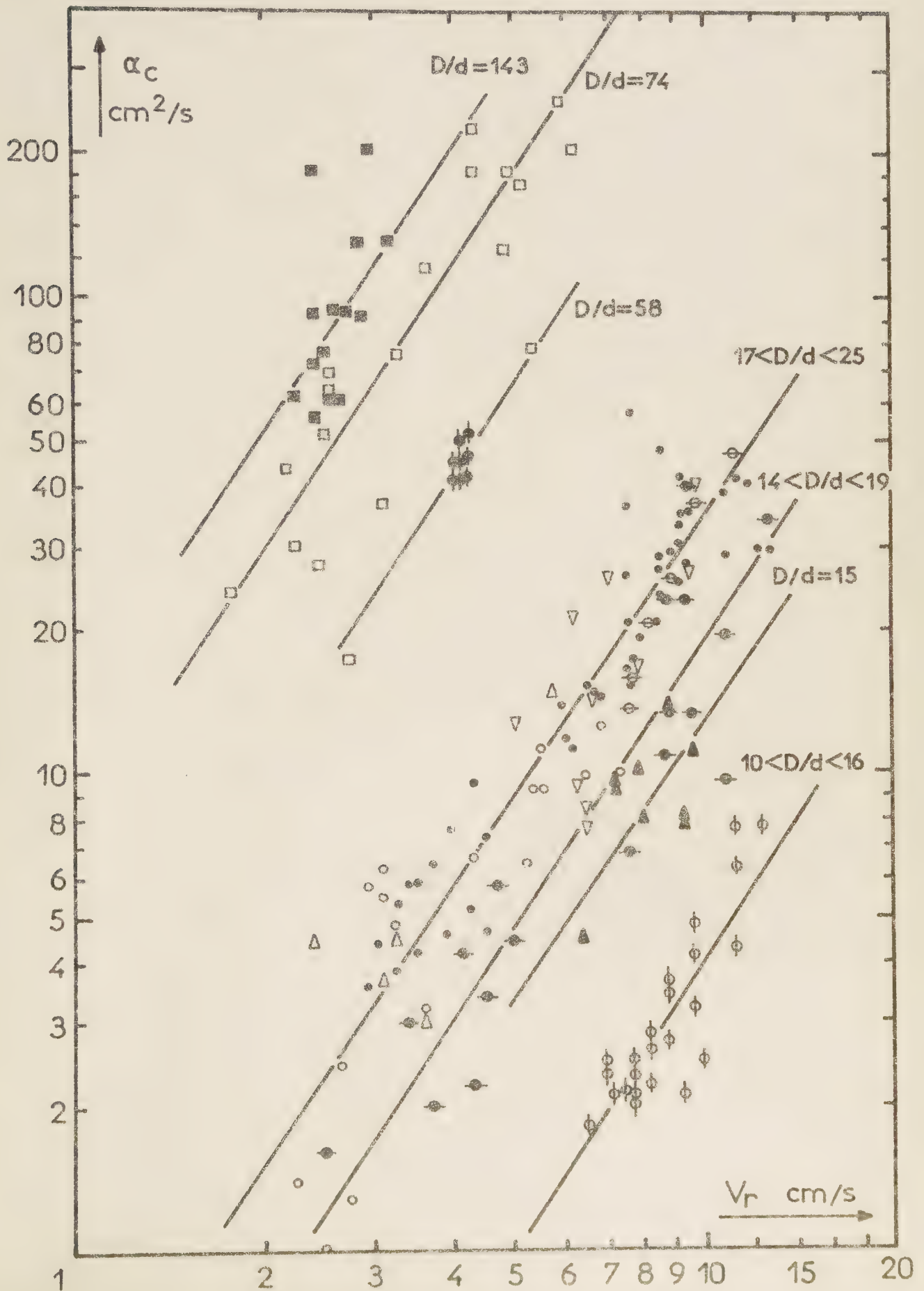
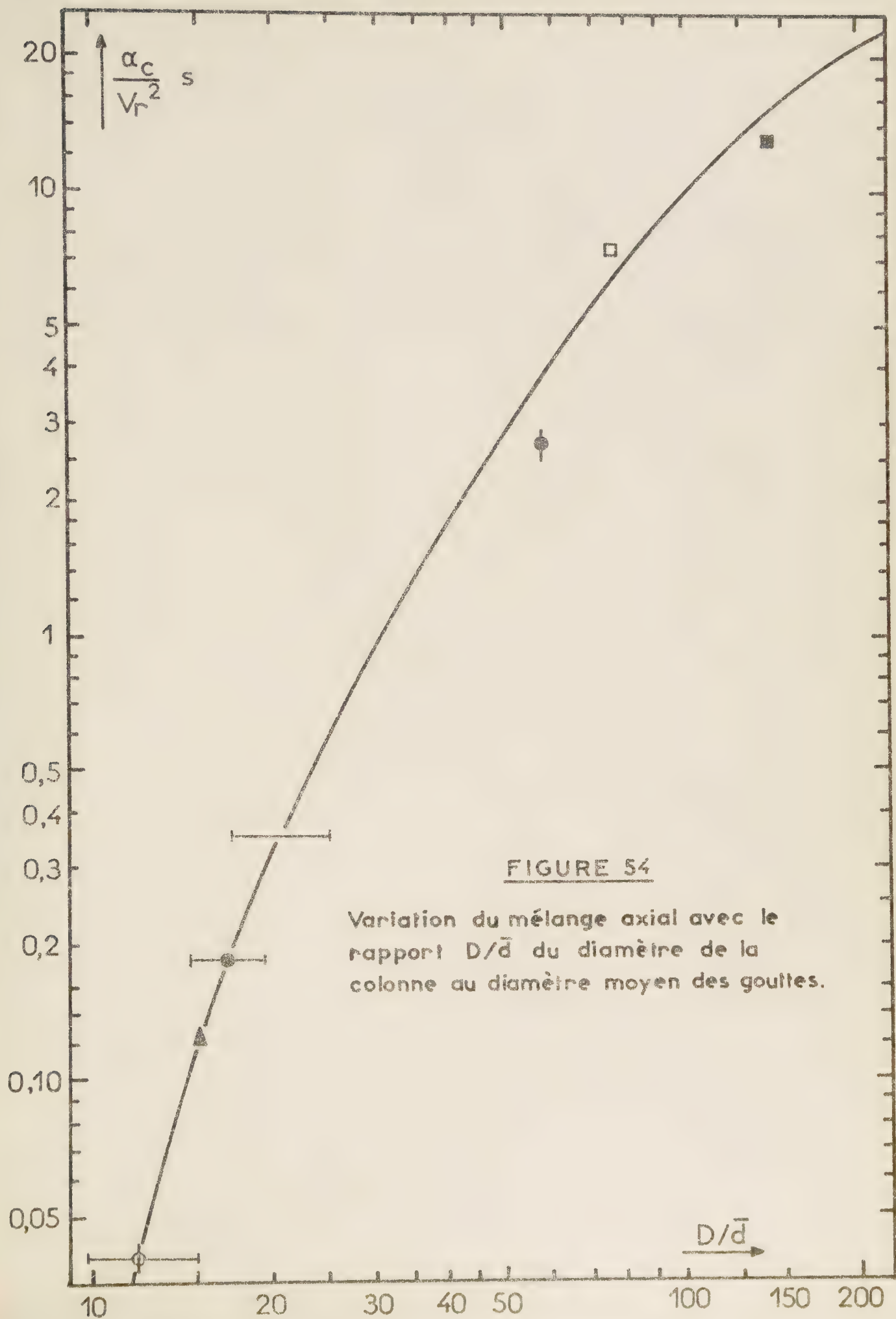


FIGURE 53

Variation du coefficient de dispersion axiale en fonction de la vitesse relative V_r et du rapport $D/\bar{d}$.





Profils-types de température dans une colonne à pulvérisation fonctionnant en lit dense.

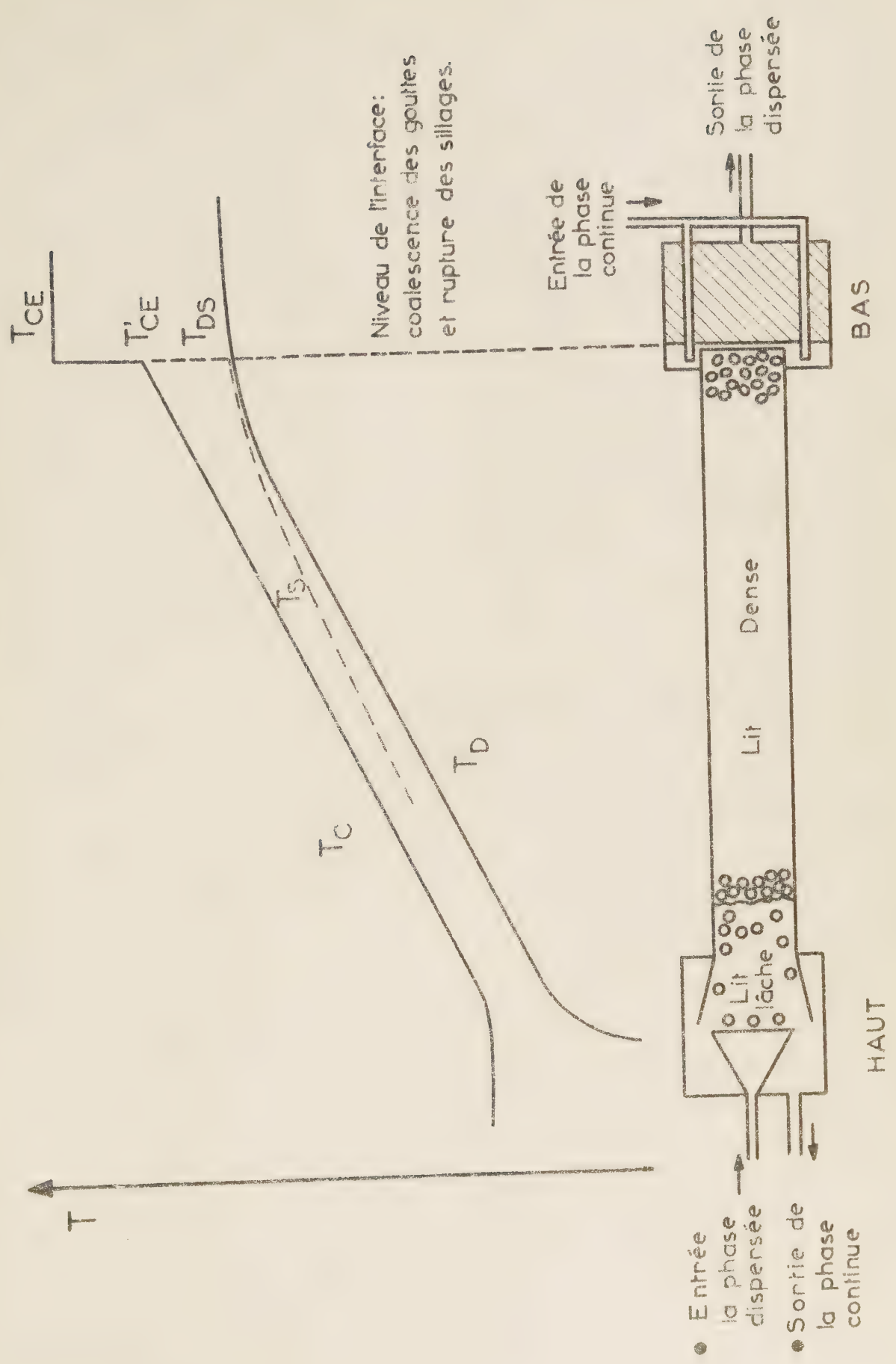
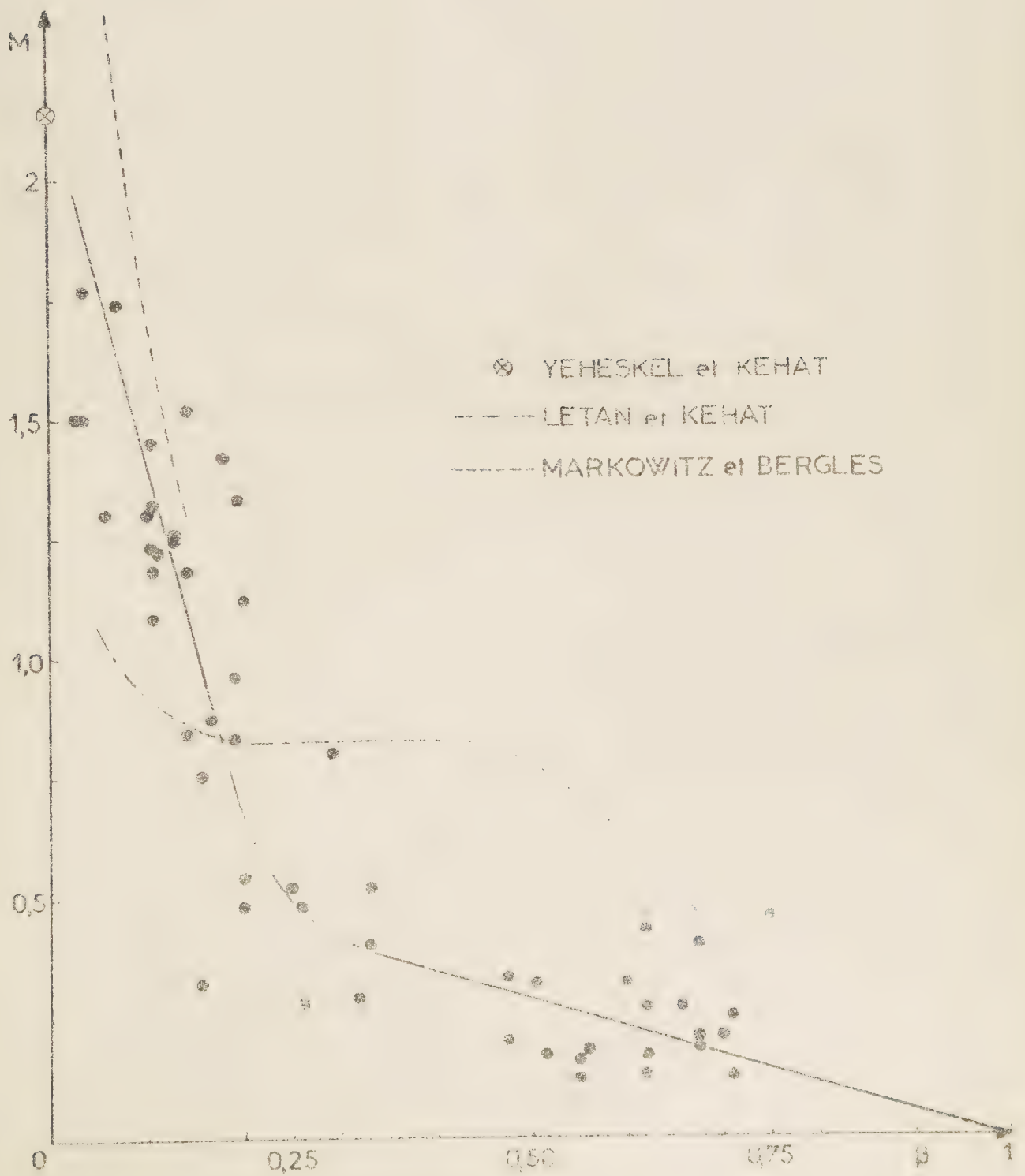
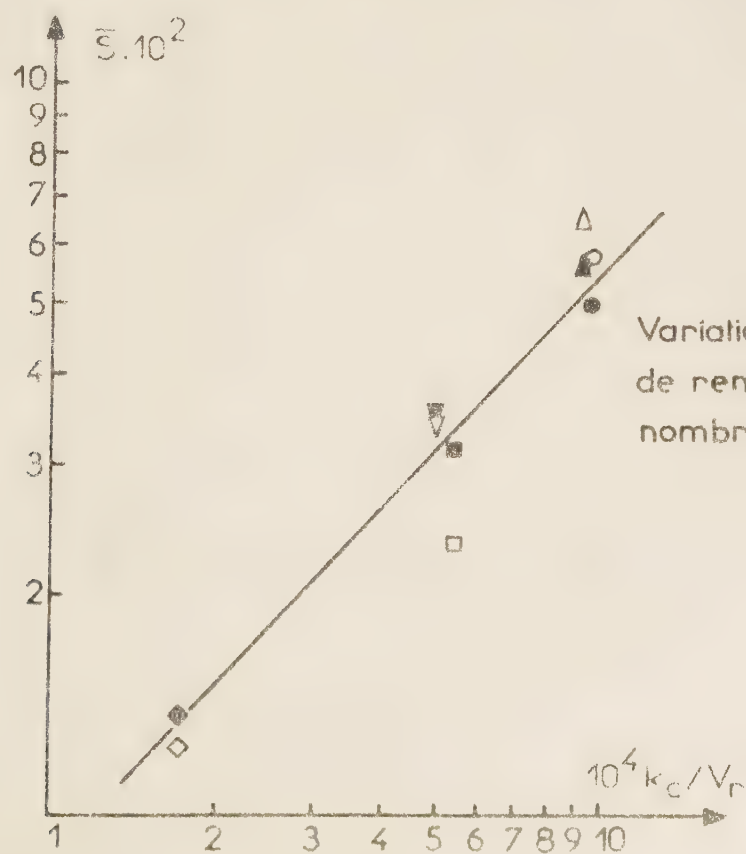
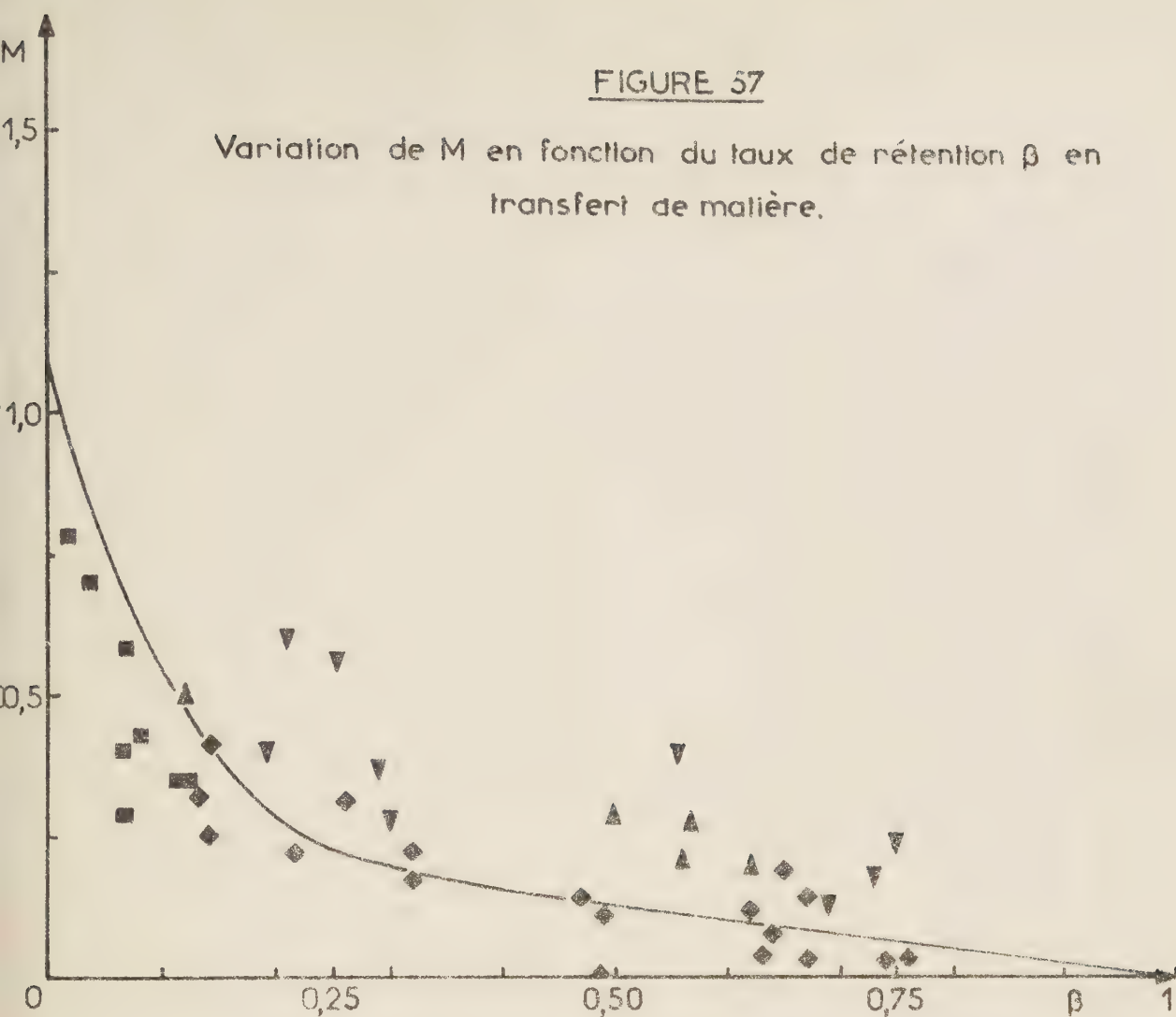


FIGURE 56

Variation de M en fonction du taux de rétention β pour le couple kérosène-eau en transfert de chaleur.





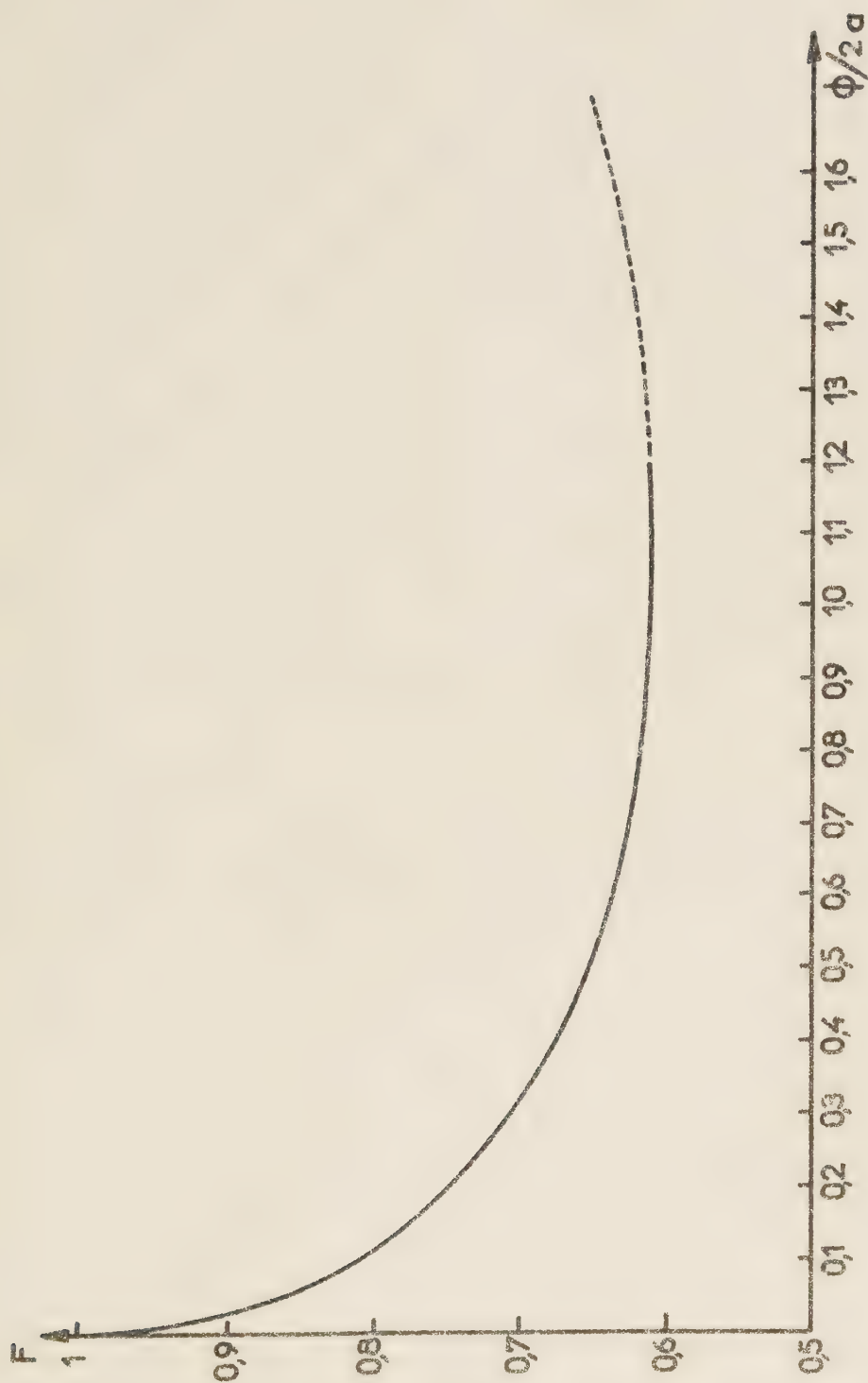


FIGURE A1

Facteur de correction de HARKINS et BROWN.

FIGURE A2

Masse volumique de la phase DMSO-Benzène
et de la phase Heptane-Benzène en fonction
du titre massique en Benzène.

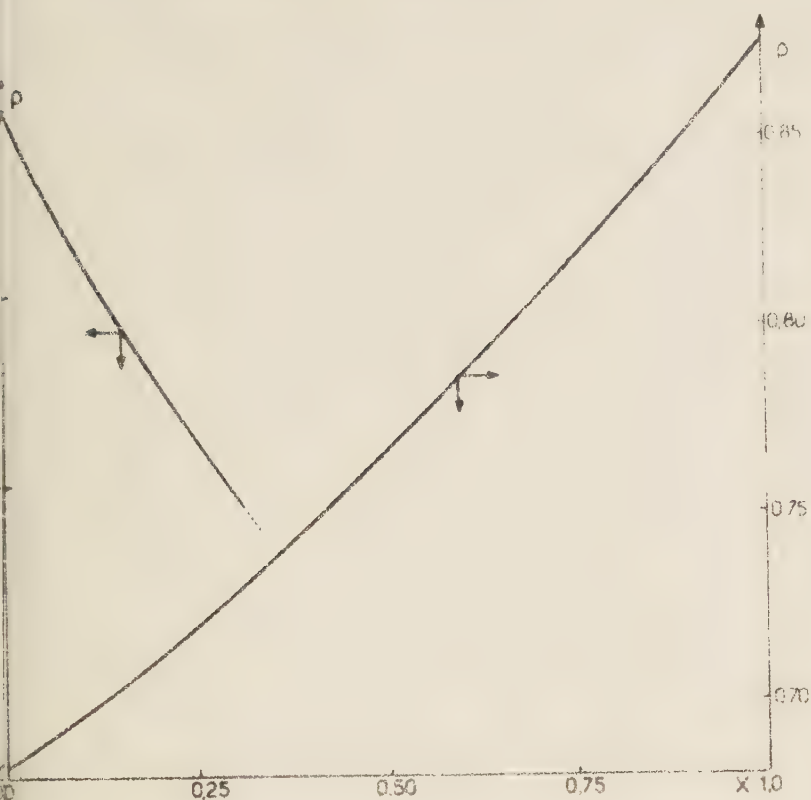


FIGURE A3

Triangulation du pic de DMSO.

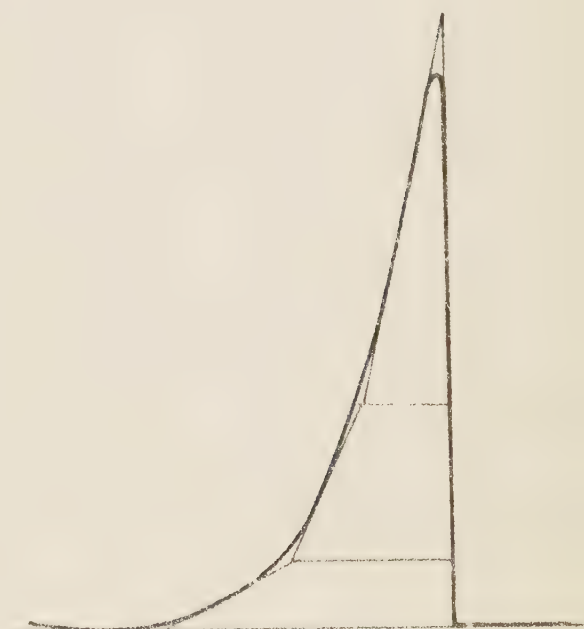


FIGURE A4

Indice de réfraction de solution
d'Acétone dans l'eau et dans l'Heptane.

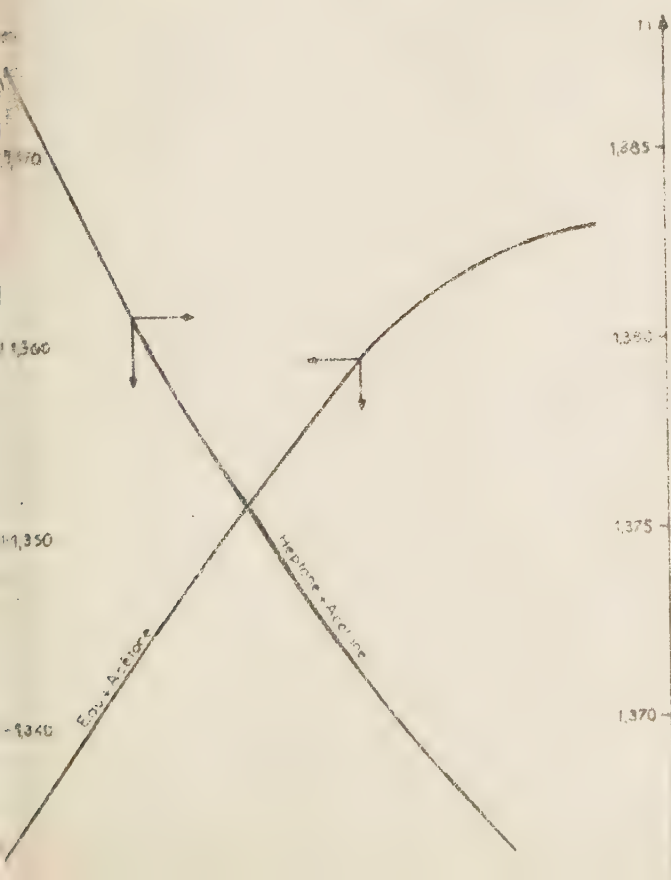


FIGURE A5

Courbe de partage de l'acétone entre
l'eau et l'Heptane.

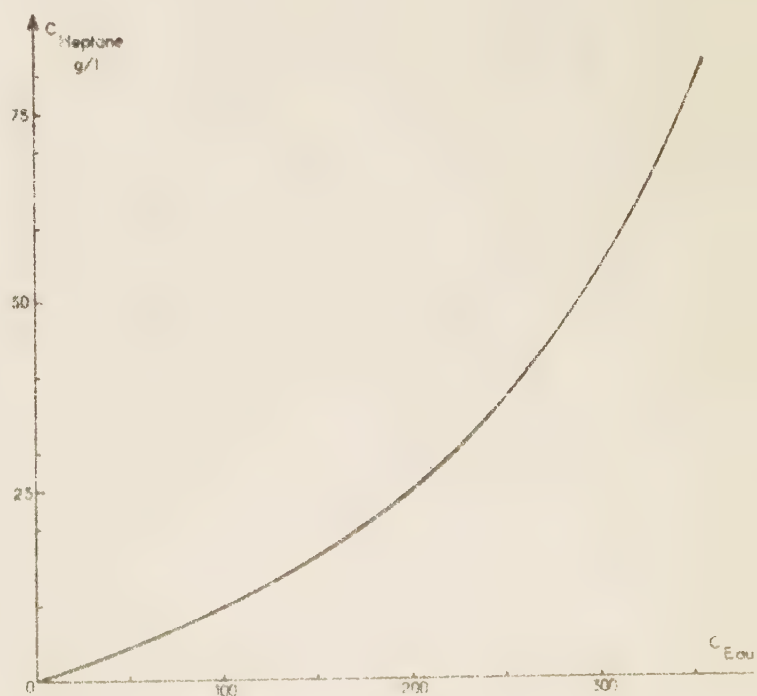


Figure A6

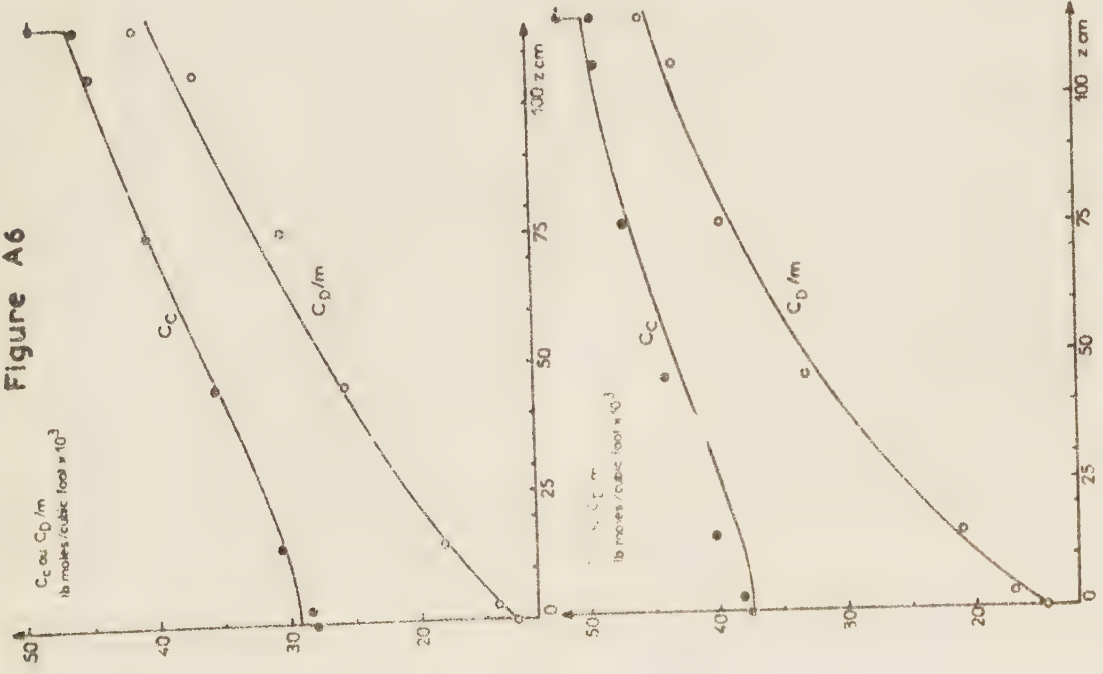


Figure A7

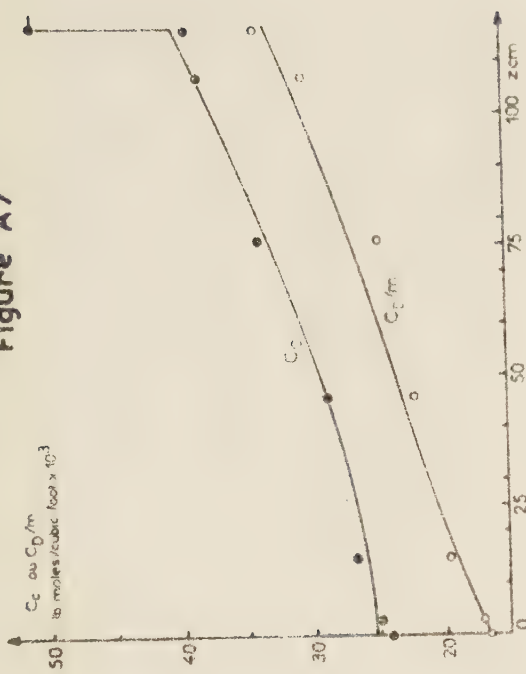


Figure A9

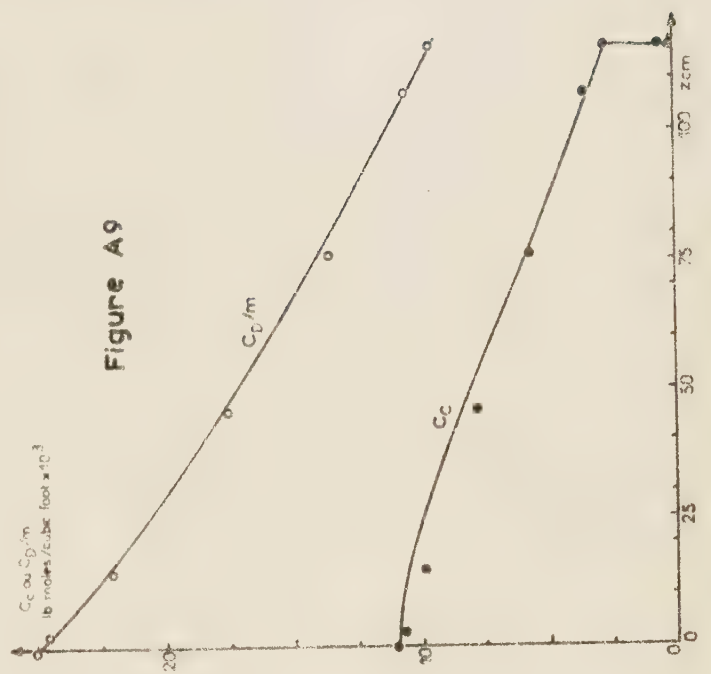


Figure A8

FIGURE A10

Schéma de la colonne utilisée pour mesurer le coefficient de transfert de matière pour une goutte isolée.

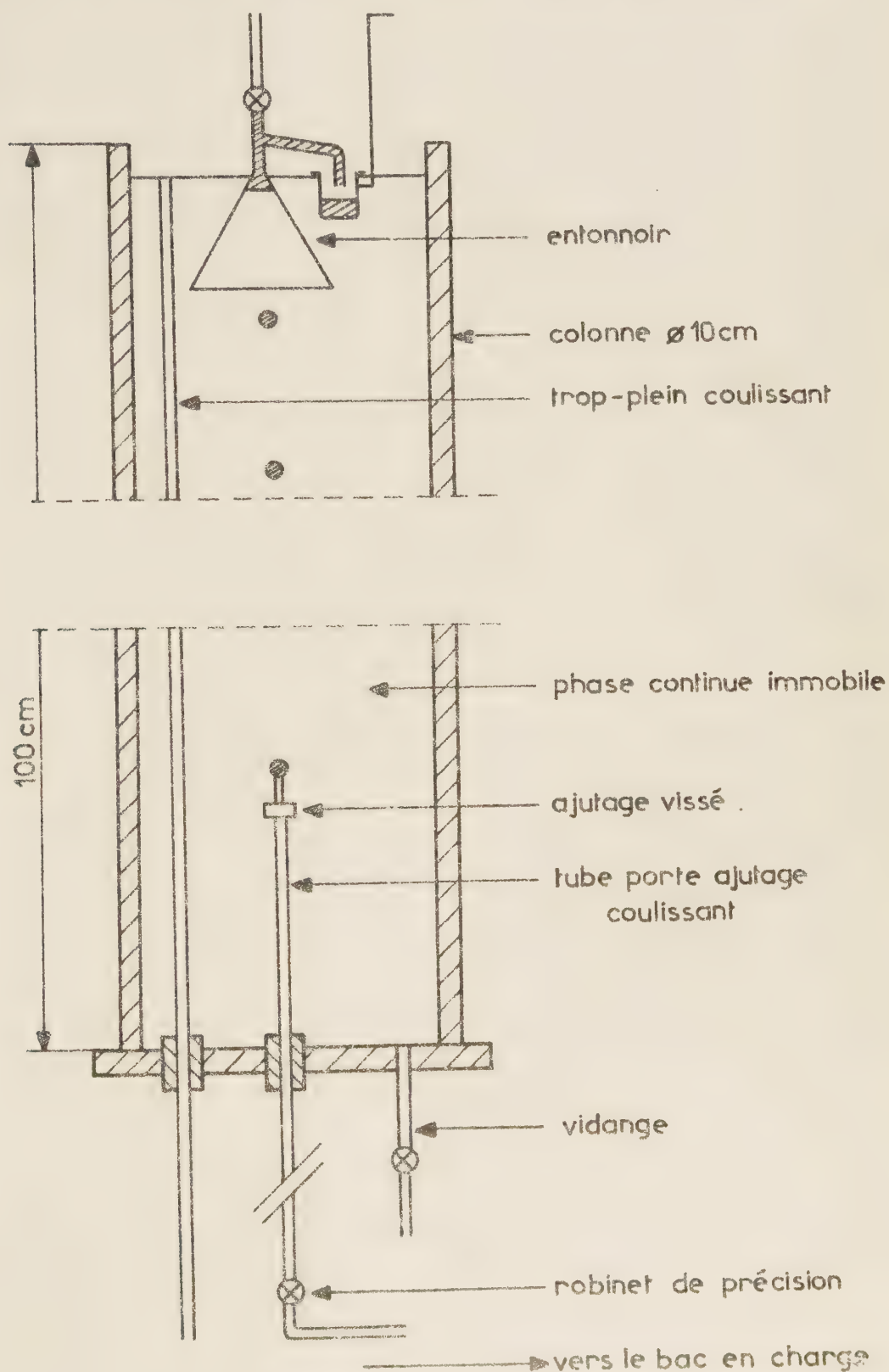


FIGURE A11

Mesure du coefficient de transfert de matière pour une goutte isolée:
variation de $1-E$ en fonction de la hauteur d'ascension Z .

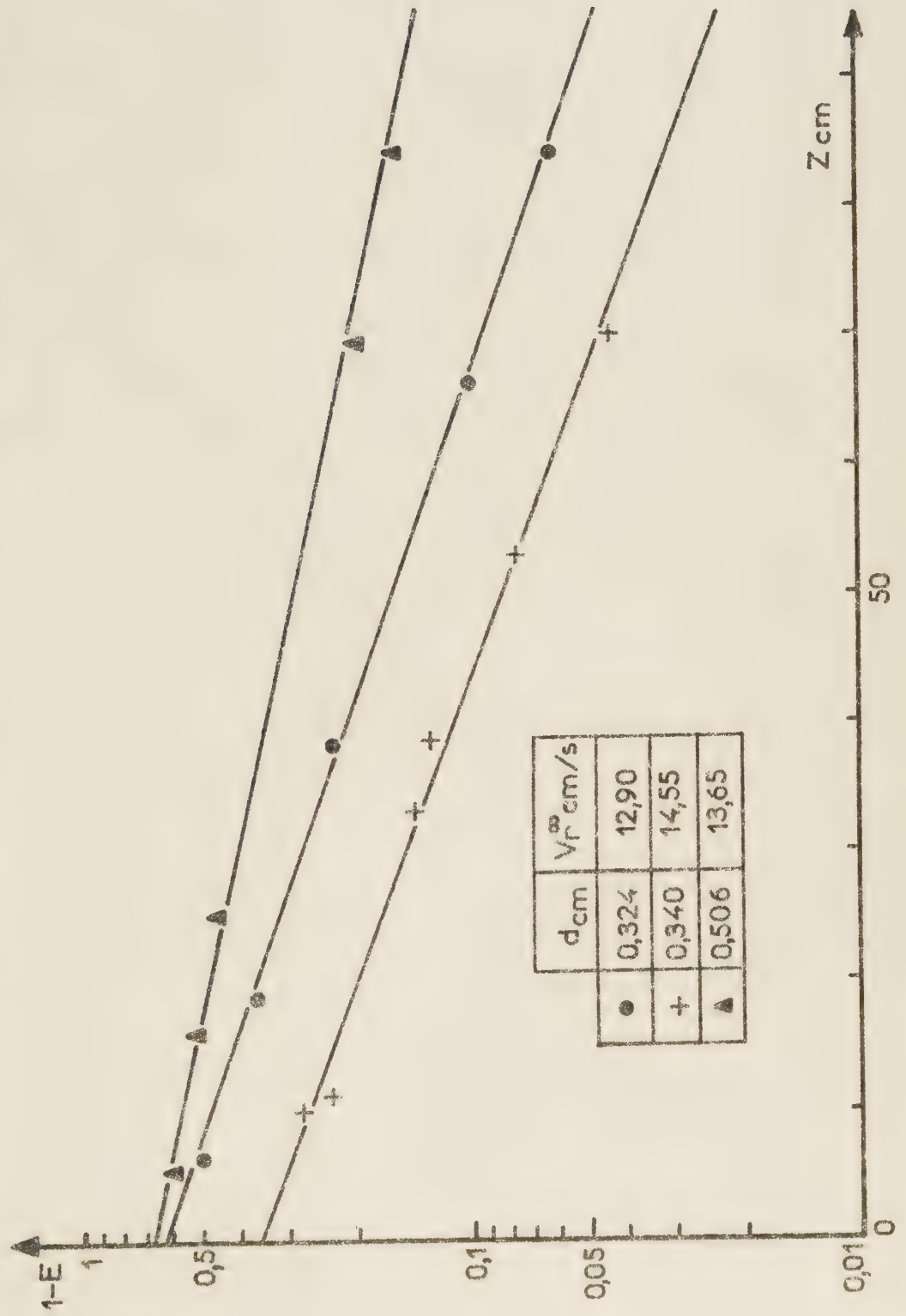


FIGURE A12

Profils de température observés par
Letan et Kehat.

